



**Universidade de  
Aveiro**  
Ano 2016

Departamento de Engenharia Civil

**RICARDO JORGE  
MACHADO DIAS**

**ESTUDO DE REFORÇOS EM ELEMENTOS DE  
BETÃO ARMADO COM CHAPAS METÁLICAS**





**RICARDO JORGE  
MACHADO DIAS**

**ESTUDO DE REFORÇOS EM ELEMENTOS DE  
BETÃO ARMADO COM CHAPAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Claudino de Pinho Cardoso, Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e co-orientação científica do Professor José Alberto Marques Lapa, Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



*Aos meus pais pelo esforço e exemplo*



**o júri**  
presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa  
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Engenheiro Carlos Manuel Rodrigues Miranda  
Diretor do Departamento de Construção da Tengermann Real Estate International (arguente)

Professor Engenheiro José Alberto Marques Lapa  
Professor Convidado da Universidade de Aveiro (co-orientador).





## **agradecimentos**

A realização da presente dissertação só foi possível com o apoio que me foi transmitido por professores, amigos e família. Embora se trate de um trabalho individual, gostaria de expressar os mais sinceros agradecimentos a todos os que direta ou indiretamente me ajudaram na realização desta dissertação.

Assim, começo por agradecer ao Professor José Lapa, por todo o apoio e orientação nos momentos em que mais precisava, tal como toda a disponibilidade prestada durante a realização desta dissertação, sempre com as palavras certas para incentivar à elaboração deste documento. Destaco o Professor José Lapa como o meu grande mentor e exemplo que me conduziu a finalizar esta última etapa do mestrado.

Agradecer a toda a minha família, sobretudo aos meus pais, Paulo e Elisabete, por todo o esforço, paciência e dedicação que empregaram ao longo de todos estes anos e especialmente nesta fase final. Sem eles, não era possível conseguir tudo o que alcancei até hoje.

Agradecer a todos os meus amigos de infância que ao longo do meu percurso académico nunca deixaram quebrar a ligação de amizade que existe. Ao Cristiano Ferreira, João Rodrigues, Pedro Santos, Pedro Vieira e Rita Fragoeiro.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos que tive a felicidade de conhecer nesta grande academia, a Universidade de Aveiro, que me acompanharam não só na elaboração deste documento, mas durante todos os anos desde que me matriculei em Engenharia Civil, e que foram as pessoas que mais me marcaram ao longo deste percurso: Ana Luísa, André Lourenço, Alexandre Peralta, Bruno Madureira, Bruno Sousa, Carlos Sousa, Diego Mendes, Fábio Vidal, Frederico Correia, Hélder Freitas, Joana Santos, José Teixeira, Luciano Lei, Miguel Silva, Pedro Costa, Rafael Mendes, Ranieri Couto, Telmo Cruz, Tiago Carvalho, Valdemar Estrelinha e a todos os membros que pertenceram ao Núcleo de Estudantes de Engenharia Civil.



## **palavras-chave**

Estruturas de Betão Armado, Reforço, Chapas metálicas, Reabilitação, Modelação.

## **resumo**

A reabilitação de estruturas tem vindo a evoluir consideravelmente ao longo dos últimos anos. Uma intervenção de reabilitação pode passar por uma simples reparação, com o objetivo de repor as condições iniciais de segurança da estrutura, ou por uma intervenção mais profunda que inclui a primeira e adicionalmente outras medidas de reforço que visam elevar os níveis de segurança.

A caracterização do tipo de intervenção requer um conhecimento pormenorizado da estrutura existente, não só ao nível do seu estado de degradação, bem como do seu comportamento estrutural.

Existe muita informação acerca do tema da reabilitação de estruturas de betão armado, mas escasseiam documentos onde essa informação venha apresentada de uma forma integrada e objetiva.

Atendendo ao referido nos parágrafos anteriores, o objetivo foi exercer uma abordagem acerca das diferentes técnicas atuais de reforço em elementos de betão armado com a adição de chapas metálicas, e elaborar uma metodologia de estudo através de modelação numérica para selecionar, conforme as diferentes circunstâncias, a melhor solução. Utilizando exemplos práticos para demonstração. Com isto pretendeu-se criar um guia de como examinar uma estrutura que necessite de intervenção, escolhendo o melhor recurso para o propósito final.



**keywords**

Reinforced concrete structures, Reinforcement, Steel plates, Rehabilitation, Modeling

**abstract**

The rehabilitation of structures has evolved considerably over the last few years. A rehabilitation intervention can go through a simple repair, in order to restore the original terms of safety parameters of the structure or, in a deeper perspective, may be necessary other measures aimed at raise the safety terms of the structures towards the current requirements.

The characterization of the type of intervention requires a detailed knowledge of the existing structure, not only in terms of its degradation state, but also its structural behaviour.

There is lots of information related to the rehabilitation of reinforced concrete structures, but lacks documents where all this information comes presented in an integrated manner and objective.

Given the above paragraphs, this work tries to address the main subjects on the different techniques of reinforced concrete elements with the addition of metal sheets and elaborate a methodology of study through numerical modelling to select, according to the different circumstances, the best solution, using practical examples to demonstrate. So, this work pretends to create a guide about how to exanimate a structure that needs intervention, choosing the best resource for the final purpose.



## INDICE GERAL

1.	Introdução .....	3
1.1.	Enquadramento Geral.....	3
1.2.	Âmbito e objetivos da dissertação .....	4
1.3.	Organização da dissertação .....	5
2.	Avaliação da segurança em estruturas de betão existentes.....	11
2.1.	Utilização do betão na construção .....	11
2.1.1.	Propriedades mecânicas do betão .....	12
2.1.2.	Regulamentação aplicável a estruturas de betão.....	13
2.2.	Avaliação de uma estrutura existente.....	15
2.2.1.	Inspeção de estruturas de betão armado .....	18
2.2.1.1.	Ensaio estruturais <i>in situ</i> .....	19
2.2.1.2.	Ensaio estruturais em laboratório .....	21
2.2.1.3.	Ensaio de durabilidade <i>in situ</i> :.....	22
2.2.1.4.	Ensaio de durabilidade em laboratório .....	23
2.2.2.	Verificação de segurança .....	24
3.	Anomalias e manutenção em estruturas existentes .....	29
3.1.	Principais anomalias das estruturas de betão armado .....	29
3.1.1.	Anomalias estruturais .....	32
3.1.1.1.	Fendilhação .....	33
3.1.1.2.	Deformações excessivas.....	34
3.1.1.3.	Corrosão de armaduras.....	35
3.2.	Proteção e reparação de estruturas de betão .....	36
4.	Tipologias de reforço em elementos de betão armado com chapas metálicas .	41
4.1.	Considerações iniciais .....	42
4.1.1.	Utilização do aço como material de reforço.....	42
4.1.2.	Interação entre as chapas metálicas e os elementos de betão armado	43
4.1.3.	Principais anomalias dos elementos de reforço .....	44
4.1.4.	Descrição técnica .....	45
4.2.	Elementos sujeitos à flexão .....	47
4.2.1.	Reforço de uma viga à flexão .....	47

4.2.1.1.	Disposições construtivas .....	48
4.2.1.2.	Dimensionamento.....	52
4.2.2.	Reforço de uma viga ao esforço transversal .....	54
4.2.2.1.	Dimensionamento.....	56
4.3.	Elementos sujeitos ao esforço axial.....	57
4.3.1.	Reforço de um pilar à compressão simples.....	57
4.3.1.1.	Disposições construtivas .....	58
4.3.1.2.	Dimensionamento.....	62
5.	Análise de tipologias de reforço em solidworks .....	67
5.1.	Considerações iniciais .....	68
5.1.1.	Dados de modelação.....	68
5.1.1.1.	Propriedades mecânicas do betão .....	68
5.2.	Modelação do elemento de betão armado .....	70
5.2.1.	Definição da viga-tipo .....	70
5.2.2.	Inserção da viga-tipo no SolidWorks .....	72
5.2.3.	Tipologias utilizadas na simulação .....	74
5.2.4.	Valores limites para o betão armado e chapas de reforço .....	77
5.2.5.	Análise do reforço 1 .....	78
5.2.6.	Análise do reforço 2.....	87
5.2.7.	Análise do reforço 3.....	93
5.2.7.1.	Análise do reforço 3a.....	95
5.2.7.2.	Análise do reforço 3b.....	100
5.2.8.	Análise global dos reforços.....	105
5.2.9.	Metodologia de cálculo .....	106
6.	Conclusões .....	111
6.1.	Possíveis ações de desenvolvimento no futuro.....	112
	Referências bibliográficas .....	117



## Índice de Figuras

Figura 1 - Expressão gráfica de desempenho natural de uma edificação com o tempo (Piffer, 2016). .....	15
Figura 2 - Aumento do custo de manutenção com o passar do tempo (Piffer, 2016). .....	16
Figura 3 - Esquema das causas naturais de degradação do betão armado. ....	30
Figura 4 - Fendilhação do betão armado. Na figura à esquerda tem-se fendilhação originada por reações expansivas, enquanto que à direita, a fendilhação é originada por cargas (Costa, 2013). .....	31
Figura 5 - Adição de chapas metálicas a elementos de betão armado (STAP, 2016). .....	45
Figura 6 - Secção transversal de uma viga sujeita a momento fletor (M), esforço transverso (V), e esforço axial (N). .....	47
Figura 7 – Tipologia 1: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica. ....	48
Figura 8 - Tipologia 2: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 - bucha metálica. ....	49
Figura 9 - Tipologia 3: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 - bucha metálica; 4 – fissuração no betão. ....	49
Figura 10 - Tipologia 4: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – cantoneira de aço. ....	50
Figura 11 - Tipologia 5: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – buchas metálicas. ....	51
Figura 12 - Tipologia 6: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – bucha metálica. ....	51
Figura 13 - Modelo de cálculo de viga à flexão com reforço através de chapa metálica para a tipologia 6. ....	53
Figura 14 - Tipologia 7: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica. ....	54
Figura 15 - Tipologia 8: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica; 4 – cantoneira de aço. ....	55
Figura 16 - Tipologia 9: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica; 4 – cantoneira de aço; 5 - chapa metálica .....	55

Figura 17 - Secção transversal de um pilar sujeita a esforço axial (N).....	57
Figura 18 - Efeito de confinamento das chapas metálicas num pilar submetido à flexão composta (Sousa, 2008).....	58
Figura 18 - À esquerda seção quadrada de um pilar encamisado. À direita o mesmo pilar em perspectiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – chapa metálica.....	59
Figura 19 - À esquerda está representada uma seção quadrada de um pilar com reforços de cantoneiras de aço. À direita o mesmo pilar em perspectiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – cantoneira de aço. ....	60
Figura 20 – À esquerda está representada uma seção quadrada de um pilar com reforços de cantoneiras de aço com uma cintagem feita através de chapa metálica. À direita o mesmo pilar em perspectiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – cantoneira de aço; 5 – chapa metálica.....	61
Figura 22 - Interface de desenho do SolidWorks.....	69
Figura 23 - Seção transversal e esquema da viga bi-encastada com as cargas exteriores representadas.....	70
Figura 24 - Diagrama do momento fletor da viga-tipo, em cima. Em baixo está representa-se o diagrama do esforço transversal para a mesma viga-tipo. Valores em kN/m para os momentos fletores, e kN para o esforço transversal. ....	71
Figura 25 – Reforço descontínuo à flexão de uma viga bi-encastada com chapas metálicas nas zonas onde o momento fletor é maior. ....	71
Figura 26 - Reforço contínuo à flexão de uma viga bi-encastada com chapas metálicas. ....	72
Figura 27 - Definição da seção da viga-tipo no SolidWorks.....	72
Figura 28 - Perspetiva da viga-tipo em SolidWorks.....	73
Figura 29 - Condições de carga e apoios na viga-tipo no SolidWorks.....	73
Figura 30 - Valores da tensão no betão após a simulação da aplicação das cargas na viga-tipo no SolidWorks. ....	74
Figura 31 - Seção transversal do reforço 1. ....	75
Figura 32 – Seção transversal do reforço 2.....	76
Figura 33 - Seção transversal do reforço 3. ....	77
Figura 34 - Definição do reforço 1 em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço. ....	78
Figura 35 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 1.....	79

## Índice de Figuras

---

Figura 36 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 1.	79
Figura 37 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 1.	80
Figura 38 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.	82
Figura 39 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 1.	83
Figura 40 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na seção transversal usada no reforço 1.	85
Figura 35 - Definição do reforço 2 em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.	87
Figura 42 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 2.	88
Figura 43 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 2.	88
Figura 44 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 2.	89
Figura 45 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.	90
Figura 46 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 2.	91
Figura 47 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na seção transversal usada no reforço 2.	93
Figura 48 - Reforço 3a.	94
Figura 49 - Reforço 3b.	94
Figura 44 - Definição do reforço 3a em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.	95
Figura 51 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 3a.	96
Figura 52 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3a.	96
Figura 53 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3a.	97

Figura 54 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga. ....	98
Figura 55 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 3a. ....	98
Figura 56 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na seção transversal usada no reforço 3a. ....	99
Figura 57 - Definição do reforço 3b em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço. ....	100
Figura 58 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 3b. ....	101
Figura 59 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3b. ....	101
Figura 60 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3b. ....	102
Figura 61 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga. ....	103
Figura 62 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 3b. ....	103
Figura 63 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na seção transversal usada no reforço 3b. ....	104
Figura 64 - Gráfico da variação da tensão do betão com o variação da área de aço de todos os reforço na seção transversal da viga. ....	105
Figura 65 – Viga usada na simulação SolidWorks com diferente carga aplicada, na direção do eixo da viga. ....	106
Figura 66 - Viga usada na simulação SolidWorks com diferente carga aplicada, na direção perpendicular ao eixo da viga. ....	107
Figura 67 - Viga usada na simulação SolidWorks com carga vertical distribuída não-uniforme. ....	107
Figura 68 - Viga usada na simulação SolidWorks com outra carga vertical distribuída não-uniforme. ....	108

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Evolução da regulamentação estrutural em Portugal (Correia, 2014).....	14
Tabela 2 – Processos a seguir num projeto de reabilitação. ....	17
Tabela 3 - Causas das anomalias em elementos estruturais (adaptado de Correia, 2006).....	32
Tabela 4 - Representação das diversas causas de fissurações em betão armado (Cóias, 2006). .....	34
Tabela 5 - Definição da divisão das partes da Norma Europeia 1504. ....	37
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do betão inseridas no SolidWorks.....	69
Tabela 7 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 1.....	81
Tabela 8 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 1. ....	84
Tabela 9 - Comparação da influência da espessura na eficiência da redução da tensão no betão em casos específicos. ....	86
Tabela 10 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 2.....	89
Tabela 11 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 2. ....	92
Tabela 12 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 3a. ....	97
Tabela 13 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 3a. ....	99
Tabela 14 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 3b...102	
Tabela 15 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 3b. ....	104



# *Capítulo 1*

---

## *Introdução*





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento Geral

As estruturas devem ser projetadas e construídas com o objetivo de satisfazer um conjunto de requisitos funcionais durante um certo período de tempo sem causar custos inesperados de manutenção e reparação. Nenhum material é por si próprio durável, é a interação entre o material e o ambiente a que está exposto que determina a sua durabilidade (Appleton & Costa, 2011).

Cada vez mais é notória a importância da manutenção das estruturas existentes. Normalmente a intervenção numa estrutura está associada a alterações das ações atuantes, alteração da sua geometria ou modificação do seu sistema estrutural e à correção de anomalias associadas a deficiências de projeto de execução ou exploração, ou até para aumentar o nível de segurança e ainda na resolução de patologias, quer por razões comportamentais, quer por degeneração da capacidade do material. Estas alterações têm dificuldades associadas que fazem com que por vezes projetar uma intervenção numa estrutura existente seja mais difícil do que dimensionar uma nova (Costa, 2012).

É necessária uma análise mais profunda às condições adjacentes, e claro, dos materiais da estrutura, tal como das ações à qual esta foi sujeita ao longo do tempo, e qual é a perspetiva desta mesma relativamente ao futuro. As dificuldades alastram-se quando a informação relativa ao projeto não é clara. A maioria dos edifícios antigos tem ausência de documentação de apoio que trate de forma integrada quer o projeto inicial, quer eventuais alterações de que tenha sofrido a estrutura (Gomes & Appleton, 1997).

Todas estas dificuldades fazem com que a elaboração de um projeto de reforço deva ser sempre precedida de uma avaliação rigorosa da estrutura existente, é necessário ser efetuada uma recolha de toda a informação disponível sobre o projeto, e possíveis alterações feitas, tal como é essencial ser executada uma inspeção onde sejam registadas todas as anomalias, bem como uma avaliação do comportamento estrutural e condições de segurança. Caso a estrutura apresente danos, é fundamental realizar o diagnóstico da situação onde é detalhado o registo e análise das anomalias encontradas, explicando de forma clara a relação entre essas causas

e os fenómenos observados. Apenas depois desta análise é possível efetuar uma definição dos objetivos a atingir com a intervenção (Correia, 2014).

Quando definida a finalidade da intervenção, há que ter em consideração os diversos tipos de operações possíveis, desde o reforço à substituição de elementos, demolição ou introdução de novos elementos estruturais (Gomes & Appleton, 1997).

Numa intervenção de reforço, deverá também proceder-se à reparação dos danos existentes. O reforço de uma estrutura pode estar associado à correção de anomalias decorrentes de deficiências de projeto, construção e utilização ou à necessidade de alterar a finalidade da estrutura. São ainda de referir situações em que se pretende reforçar uma estrutura para aumentar os seus níveis de segurança, nomeadamente em relação à ação sísmica. Um projeto de reforço deverá incluir para além do seu dimensionamento, uma avaliação analítica da eficácia da intervenção. Durante e após a sua execução deveria sempre que possível, realizar-se ensaios, como por exemplo os de carga, para as ações estáticas de serviço por forma a comprovar o resultado de intervenção (Gomes & Appleton, 1997).

Estudos indicam que 25% dos donos-de-obra estão descontentes com o desempenho dos materiais de reparação e proteção no período de 5 anos após a reabilitação; 75% estão insatisfeitos no período de 10 anos o que indica que caso seja feita uma intervenção, é necessário que tanto a solução como os materiais utilizados tenham qualidade (CONREPNET, 2004).

### **1.2. Âmbito e objetivos da dissertação**

Nesta dissertação irá ser elaborado um estudo sobre os reforços em elementos de betão. Sendo uma área ainda com pouca divulgação, em que muitas das técnicas e tipologias não são do domínio técnico comum, o objetivo é a otimização da aplicação de reforços no caso concreto da utilização de chapas metálicas em elementos de estruturas de betão armado. Dependente de caso para caso, alguns reforços têm mais eficácia do que outros, no entanto pretendendo-se adquirir uma informação mais generalizada sobre quais as melhores soluções a adotar. Tendo sempre presente o custo-benefício em cada aplicação: a ideia simplista do objetivo do estudo é que quanto menos material se utilizar, menor será o custo da intervenção, não se entrando neste estudo prévio com os custos de mão de obra e de equipamentos. A eficácia

também será um aspeto fundamental neste estudo. Por vezes certas geometrias, ou zonas de aplicação têm mais eficiência na resistência dos esforços. Com tudo isto, deseja-se que durante um estudo de reforço, seja possível ver o que vale a pena ter em consideração, tal como, consoante algumas das condições mais frequentes, poder admitir que certo tipo de reforço é mais aconselhável.

Pretende-se no final do presente trabalho, também obter um documento que sirva como guia de dimensionamento de reforços, criando uma metodologia de cálculo através de um software.

### **1.3. Organização da dissertação**

No segundo capítulo, ir-se-á apresentar a importância da avaliação da segurança em estruturas de betão armado. É o primeiro passo para caracterizar o estado de uma estrutura existente, demonstrar-se-á em que normas a avaliação se deve apoiar, e os requisitos de segurança a que uma estrutura está predisposta

No terceiro capítulo irá ser feito um estudo sobre as anomalias mais frequentes em estruturas de betão armado. O que geralmente condiciona o comportamento do betão, tal como os riscos e fatores que influenciam o tempo de vida da obra. Ainda nesta contextualização demonstrar-se-á vários exemplos. A importância deste capítulo é elevada, pois permite saber quais são as necessidades que precisam de ser colmatadas. Tem interesse saber quais são os erros frequentes na construção, para não se repetirem, mas também para a entidade que irá fazer a intervenção, tem mais interesse ainda saber quais foram esses erros, pois poderão saber como os contornar com o reforço ou outro tipo de intervenção, sem que se voltem a repetir no futuro.

No quarto capítulo, após ter sido feito o estudo de patologias em betão armado, proceder-se-á ao estudo das diferentes tipologias mais usadas para o reforço de cada elemento. Esta fase permite saber quais são os procedimentos mais usados, e é aqui que a atenção desta dissertação se vai focar. Técnicas para a escolha da tipologia mais adequada pode possibilitar uma mais rápida otimização desse procedimento. Irá ser feito apenas o estudo sobre os elementos de betão: pilares e vigas, utilizando-se chapas metálicas para o reforço. Existem diferentes tipologias consoante o tipo de estrutura, daí a razão para ser focada a atenção apenas para estes elementos, pois

permite mais facilmente criar um procedimento de escolha e depois extrapolar para outras situações de esforços conjuntos nos elementos e até de poder-se chegar a procedimentos para os nós de ligação entre elementos ou apoios. Dado que esta abordagem ao tema é feita numa fase de procura de procedimentos, procurou-se centrar o estudo na forma e quantidade do reforço, pelo que não se vai abordar os tipos de ligações entre o material de reforço e o material reforçado, mas apenas o incremento de resistência que é dado à estrutura pelo material de reforço, supondo que a ligação entre os materiais é efetiva.

Após este estudo, no quinto capítulo irá ser feita uma análise das tipologias abordadas no segundo capítulo. Qual a sua eficiência e se a aplicação pode ser diferente. Para isso irão ser apenas considerados comportamentos básicos e típicos como exemplos. Com a utilização do programa SolidWorks poder-se-á oscilar o reforço quer na sua geometria, quer na zona de aplicação, quer na sua própria área. Com isso pretende-se, através da aplicação de carregamentos, verificar o desempenho de cada tipologia dos reforços e daí retirar conclusões sobre quais os mais eficazes, procurando uma técnica simples e objetiva de verificação do tipo de reforço mais recomendável para cada situação.

No sexto capítulo irá ser feita a discussão de resultados obtidos nos capítulos anteriores, e apresentar-se-á as conclusões deste trabalho, bem como desafios futuros.

Este estudo é desafiante, pois como já foi indicado antes, não há muita informação acerca das tecnologias de reforço e de como decidir quais as mais eficazes. A reabilitação é cada vez mais uma área de futuro na construção civil e por isso é importante a procura de técnicas de auxílio à decisão de projetistas, para que possam ser mais eficazes e produtivos.

O porquê de escolher o betão armado como material a ser reforçado, é simplesmente porque é o material que foi e é mais utilizado na construção em Portugal. Com a sua abundância, surgirá cada vez mais, necessidade de reabilitação de estruturas deste material, cuja média de tempo útil para os edifícios correntes é de 50 anos, mas que

na prática se verifica que numa percentagem muito alta, já têm patologias de material na primeira metade do seu ciclo de vida. De modo que se possa prolongar, ou até mesmo cumprir esse tempo de vida, tornam-se normalmente necessários trabalhos de reabilitação para o que se procura metodologias e informação de técnicas mais expeditas para a utilização das muitas técnicas de reforço e recuperação deste material (Correia, 2014).

Outra escolha que foi feita, foi quanto ao material de reforço. A opção tomada foi o aço e dentro da panóplia de possibilidades de reforços, o de chapas de reforço. Apesar de ser possível outro tipo de materiais para o reforço em elementos de betão armado, como por exemplo, os materiais compósitos, optou-se pelo aço pois é um material resistente e que possibilita baixos custos e bastante versatilidade de utilização. Em termos de reforço de estruturas de edifícios, a utilização do aço é uma das possibilidades mais óbvias devido a não ser necessário mão-de-obra muito especializada na sua aplicação e também não implica grandes conhecimentos de cálculo estrutural, o que torna esta técnica muito utilizadas em situações mais correntes de reabilitação estrutural (Lopes M. , 2000).



# *Capítulo 2*

---

*Avaliação da segurança em  
estruturas de betão existentes*





## **2. AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA EM ESTRUTURAS DE BETÃO EXISTENTES**

### **2.1. Utilização do betão na construção**

O betão armado surgiu em 1850. Este material, tem que apresentar resistência e durabilidade e principalmente aderência entre o betão e o aço, para funcionar adequadamente como elemento estrutural. O betão tem na sua constituição, cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita, pedra), enquanto o aço é normalmente utilizado na sua forma de varão (Aguiar, 1994).

A produção de betão em Portugal é regulada pela norma NP EM 206-1:2007 “Betão – Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade”, a qual dedica especial atenção aos aspetos relacionados com a especificação do betão. Para o cálculo estrutural em betão armado, o EC2 baseia-se na NP EM 206-1:2007 e especifica classes de resistência definidas de acordo com os princípios desta norma. No EC2, as classes de resistência do betão, baseiam-se no valor característico da resistência referido a provetes cilíndricos,  $f_{ck}$ , determinado a 28 dias. Para além de cilindros, a norma prevê a determinação da resistência à compressão em cubos. Os provetes cilíndricos de referência têm 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, enquanto os cubos têm 15 cm de aresta (Correia, 2014).

Devido às suas inúmeras vantagens, o betão armado tem sido o material mais usado na construção de edifícios residenciais, industriais e públicos, pontes, viadutos, barragens, túneis, silos, reservatórios etc. Entre as vantagens deste material de construção destacam-se (Sousa, 2008):

- Baixo custo relativo;
- Disponibilidade dos seus materiais componentes em quase todos os lugares, bem como de betão pronto junto das principais urbes;
- Versatilidade, adaptabilidade, durabilidade e rapidez de construção, tal como a sua própria fabricação.
- Grande resistência a esforços de compressão no betão, tal como resistência ao fogo, impermeabilidade e razoável resistência contra choques e vibrações.

Tem interesse estudar o do comportamento deste material com os anos, visto que a maior parte da edificação em Portugal é construída usando-o como base estrutural.

### 2.1.1. Propriedades mecânicas do betão

Visto que o objetivo é a otimização de reforços em elementos de betão armado em que a secção a reabilitar se supõe ter perdido a resistência do aço ou a sua aderência, é necessário um conhecimento profundo das propriedades mecânicas do material original, pois poderá ser utilizado como colaborante com os reforços em chapa de aço. Saber como o betão armado se comporta quando é sujeito às diferentes ações externas é importante para a previsão do comportamento do mesmo.

Como já foi dito, umas das vantagens do betão, é a sua elevada resistência à compressão. Essa resistência pode ser influenciada pela resistência da argamassa que compõe o betão, no caso dos betões de baixa e média resistência, e também pela resistência dos agregados grossos, no caso dos betões de alta resistência. Devido à sua heterogeneidade, nas direções perpendiculares à ação aplicada geram-se simultaneamente tensões de tração e de compressão que estão em equilíbrio. Quando as tensões de compressão uniaxiais atingem cerca de 40% da tensão de rotura, as fendas de aderência existentes entre os agregados e a pasta começam a aumentar, propagando-se para a matriz quando se atinge cerca de 50% da tensão de rotura. Estas fendas são fundamentalmente paralelas à força exterior aplicada (Cachim & Morais, 2013).

A resistência à tração é essencialmente influenciada pelos mesmos fatores que a resistência à compressão, não sendo, no entanto, proporcionais. A resistência à tração é muito mais influenciada pelo método de ensaio utilizado e pelo efeito de escala do que a resistência à compressão. Num elemento de betão submetido a uma tensão de tração uniforme, as microfendas que já se encontram presentes no betão mesmo antes da aplicação das cargas começam a propagar-se quando as tensões atingem cerca de 70% da tensão de rotura. Assim, a relação tensão-extensão é praticamente linear até se atingir este valor da tensão. As fendas começam posteriormente a propagar-se sendo essencialmente perpendiculares à força

aplicada. Quando as fendas atingem uma dimensão crítica, dá-se a rotura do elemento (Cachim & Morais, 2013).

As deformações elásticas do betão dependem em grande parte da sua composição e em particular dos módulos de elasticidade dos seus componentes. Em especial os agregados desempenham um papel fundamental no módulo de elasticidade do betão. O valor do módulo de elasticidade é definido, de acordo com o EC2, a partir da resistência à compressão. Existe um conjunto grande de expressões que relacionam estas duas grandezas, mas é necessário ter em consideração que há uma grande dispersão de resultados e que, conseqüentemente, os valores obtidos para o módulo de elasticidade através da utilização destas expressões são um valor indicativo (Cachim & Morais, 2013).

Conta-se, portanto, que o perigo reside essencialmente nas zonas em que o betão está tracionado. Ao contrário do aço, por exemplo, o betão não é considerado um material flexível, que permita ter um aviso prévio de possível colapso através do acompanhamento de deformações, antes sendo um material com rotura frágil (Aguiar, 1994).

### 2.1.2. Regulamentação aplicável a estruturas de betão

Do ponto de vista regulamentar, as estruturas de betão devem seguir legislação ou normativas aplicáveis em Portugal. Com o passar dos anos, existiu uma evolução desta regulamentação estrutural.

Na seguinte tabela informa-se que normas foram e são aplicáveis ao dimensionamento de estruturas e a sua evolução.

Tabela 1 - Evolução da regulamentação estrutural em Portugal (Correia, 2014).

<b>REGULAMENTOS/NORMAS</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
<b>RBA-35</b> <b>Regulamento do betão armado</b>	Sintetiza o estado do conhecimento no domínio do betão armado.
<b>RSEP-61/71</b> <b>Regulamento de solicitações em edifícios e pontes</b>	Reúne num documento único as disposições sobre as solicitações a considerar no dimensionamento das estruturas de edifícios e pontes.
<b>EBA-67/76</b> <b>Regulamento de estruturas de betão armado</b>	Contém regras gerais a aplicar no projeto e construção de estruturas de betão armado, e em especial a edifícios. É introduzido o conceito de verificação da segurança em relação a estados limites, em substituição do critério tradicional, baseado em tensões de segurança.
<b>RSA-83</b> <b>Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes</b>	Atualiza a regulamentação portuguesa relativa a estruturas de edifícios e pontes, harmonizando-a com as modernas tendências internacionais
<b>REBAP-85</b> <b>Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado</b>	Revoga o REBA-67, compatibilizando o projeto de estruturas de betão com a filosofia de segurança consignada pelo RSA-83
<b>EUROCÓDIGOS</b> <b>Foram publicados entre 1998 e 2002, 17 normas portuguesas (NP)</b>	Os Eurocódigos Estruturais são documentos de referência, destinando-se a comprovar a conformidade dos edifícios e das obras de engenharia civil com requisitos essenciais estabelecidos na DPC, designadamente resistência mecânica e estabilidade e segurança em caso de incêndio.

## 2.2. Avaliação de uma estrutura existente

A durabilidade de uma estrutura de betão armado é a aptidão para desempenhar as funções para as quais foi projetada, durante um período previsto, sem necessitar de manutenção nem reparações. Os objetivos do projeto de uma estrutura devem ser a segurança, a qualidade das condições de serviço e a durabilidade. Daqui surge a necessidade inicial de estudar as patologias existentes em estruturas de betão armado. Para o objetivo desta dissertação, esta necessidade surge na condição de eliminar ou conter estas anomalias, através de reforços (Carvalho, 2012).

Maior parte das patologias encontradas nos elementos de betão, não são de carácter estrutural, e como tal, não é necessária uma intervenção profunda, pois não põem em risco as funcionalidades da estrutura. No entanto, caso estas anomalias não sejam identificadas e cuidadas, podem-se tornar em maiores problemas. E por vezes o custo de reparação pode crescer exponencialmente, comparado com uma intervenção inicial (Aguiar, 2002).

Através da figura 1, pode-se verificar que, naturalmente um edifício vai perdendo as suas capacidades ao longo do tempo.

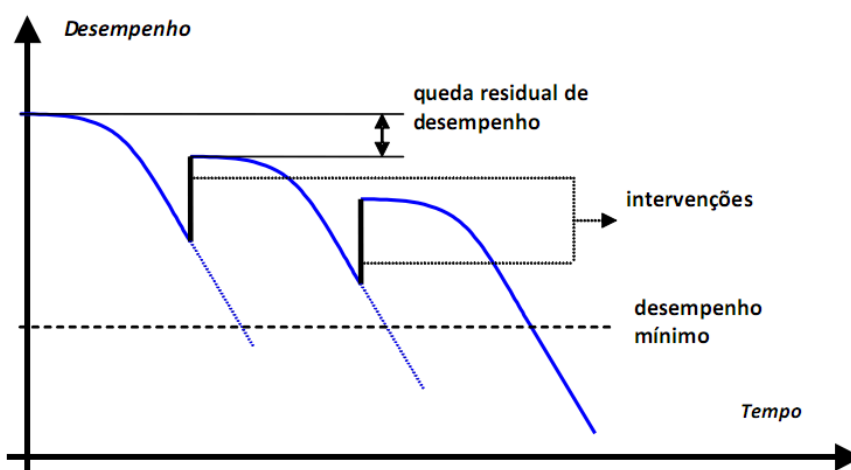


Figura 1 - Expressão gráfica de desempenho natural de uma edificação com o tempo (Piffer, 2016).

Conforme esta diminuição de desempenho, pode significar a que seja necessária ser feita uma intervenção. Esta intervenção pode ter mais ou menos custos conforme a

celeridade que seja feita. Sabendo isto, é natural que haja uma preocupação no que toca à manutenção de estruturas. Na figura 2 é ilustrado um gráfico que se verifica o aumento do custo da manutenção conforme o tempo.

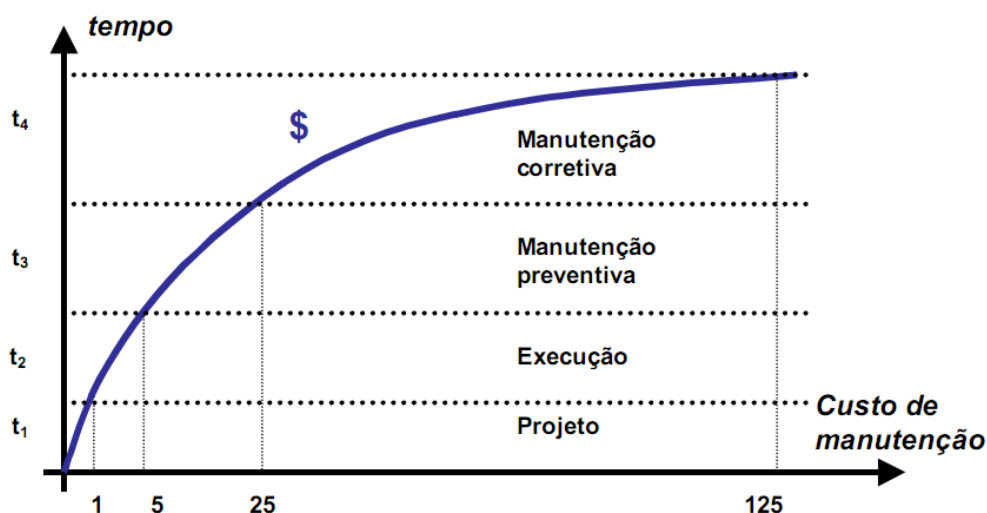


Figura 2 - Aumento do custo de manutenção com o passar do tempo (Piffer, 2016).

Com esta informação, pode-se concluir que as estruturas além de terem necessidade de serem bem executadas, também necessitam de cuidados após a construção. Esses cuidados são tidos em conta através de inspeções periódicas aos edifícios. O tempo de vida útil de uma estrutura depende de variadíssimos fatores. Conforme esses fatores forem ou não significativos, podem alterar o tempo para o qual a estrutura foi dimensionada.

Posto isto, mais à frente, debruçar-se-á acerca de quais as anomalias mais frequentes, conseqüentes desta falta de manutenção, ou mesmo falta de rigor em projeto ou em execução, tal como através de condições não previstas no dimensionamento, como por exemplo, ações sísmicas.

Para a avaliação de uma estrutura existente, é necessário seguir uma série de procedimentos antes de intervir. De um modo geral e resumido, organizam as etapas de um projeto de reabilitação na seguinte tabela estruturada (adaptado de Sousa, 2008):

**Tabela 2 – Processos a seguir num projeto de reabilitação.**

<b>1ª FASE – AVALIAÇÃO DO ESTADO DA ESTRUTURA</b>	
<b>Recolha de informação</b>	
<b>Elementos de projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Peças desenhadas;</li> <li>ii. Peças escritas.</li> </ul>
<b>Elementos de obra</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Telas Finais;</li> <li>ii. Registos de fiscalização;</li> <li>iii. Livro de obra.</li> </ul>
<b>História da estrutura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Registo de alterações de uso da estrutura;</li> <li>ii. Registo de anteriores intervenções de reparação/reforço.</li> </ul>
<b>Levantamento da geometria da estrutura atual</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Recolha da dimensão real dos elementos estruturais;</li> <li>ii. Verificação da introdução/supressão de elementos estruturais;</li> <li>iii. Verificação da conformidade do sistema estrutural do projeto/obra.</li> </ul>
<b>Inspeção da estrutura</b>	
<b>Abordagem nível 1</b>	Registo, visualização, análise e eventual quantificação de defeitos visíveis e potenciais nos elementos estruturais (fendilhação, deformação, deterioração do betão, deterioração do aço etc).
<b>Abordagem nível 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Quantificação das propriedades mecânicas do betão e do aço através de ensaios “in situ” ou em laboratório;</li> <li>ii. Quantificação das anomalias registadas na abordagem nível 1 através de ensaios “in situ” ou em laboratório.</li> </ul>

<b>2ª FASE – AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURA</b>	
<b>Verificação da segurança da estrutura face às condições iniciais de projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Verificação aos estados limites últimos;</li> <li>ii. Verificação aos estados limites de utilização.</li> </ul>
<b>Verificação da segurança face às novas exigências de utilização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Verificação aos estados limites últimos;</li> <li>ii. Verificação aos estados limites de utilização.</li> </ul>
<b>3ª FASE – CARACTERIZAÇÃO DO TIPO E OBJETIVOS DA INTERVENÇÃO</b>	
<p>Face aos resultados da 1ª e 2ª fase, deverá optar-se uma das seguintes estratégias:</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Não intervir;</li> <li>ii. Reparar em pequena escala;</li> <li>iii. Reparar e eventualmente reforçar;</li> <li>iv. Reforçar;</li> <li>v. Demolir.</li> </ul>
<b>4ª FASE – PROJETO DE REABILITAÇÃO</b>	

### 2.2.1. Inspeção de estruturas de betão armado

A identificação das anomalias e caracterização da segurança e do estado de deterioração de uma estrutura pode ser feita através de uma inspeção visual ou por ensaios.

Existem diferentes níveis de inspeção, mas todas necessitam de um planeamento inicial, como foi descrito na tabela 2 do subcapítulo 2.2.



A preparação dos trabalhos e planeamento da inspeção passa por uma recolha de informação da obra em questão, e pode incluir uma visita preliminar. O planeamento da inspeção passa por obter uma definição dos objetivos da inspeção, preparar uma primeira avaliação das anomalias, e estabelecer estratégias para uma inspeção mais profunda. Como é perceptível pela tabela 2, do subcapítulo anterior, é necessário nesta fase delinear quais os testes que irão ser feitos, tal como elaborar uma definição das regiões tipo para os diferentes elementos estruturais, tendo em conta a sua geometria e condições de exposição diferenciadas.

A inclusão do planeamento dos meios logísticos, organização da equipa de inspeção, programação dos trabalhos, estimativa de custos e preparação dos meios de segurança para a realização da inspeção também terão de ser analisados. Tudo isto é complementado pela produção de desenhos para registo das anomalias e localização dos ensaios (Correia, 2014).

No caso mais concreto do betão armado, existe uma série de possíveis ensaios a realizar. Pode-se dividir os tipos de ensaios no betão armado entre ensaios em laboratório, e ensaios *in situ*. Além disso pode-se também distinguir quais os que são pretendem testar as funcionalidades estruturais do betão, e os que são realizados para análise da durabilidade. De seguida demonstra-se os tipos de ensaios mais frequentes, que se pode fazer para os diferentes casos, com base na informação retirada de Sousa (2008).

### **2.2.1.1. Ensaios estruturais *in situ***

Este tipo de ensaios tem como objetivo determinar as características estruturais dos materiais envolvidos, bem como analisar o comportamento da estrutura em condições de serviço.

- Ensaio Esclerométrico:

Para este ensaio é utilizado um esclerómetro do tipo de Schmidt. Neste tipo de ensaio pretende-se medir a dureza superficial do betão, a qual se correlaciona com a tensão de rotura por compressão do betão, a partir de um ábaco de correlação entre estas grandezas. Este ensaio é muito utilizado devido à facilidade de manuseamento do aparelho e de obtenção de resultados. O inconveniente é que os resultados são

representativos de uma camada superficial de betão de 5 cm, pelo que se podem considerar pouco viáveis.

- Carotagem de betão:

Permite saber com o uso da carotadora, a resistência do betão à compressão, o módulo de elasticidade, de fluência e de retração do betão *in situ* a partir do ensaio em laboratório de carotes de betão e de carotes de betão recolhidos *in situ*. É necessária uma identificação prévia da localização das armaduras.

- Ensaio de aderência por tração pull-off:

Para este ensaio, é necessário uma carotadora portátil, coroa diamantada, caixa diferencial, aparelho mecânico de aderência, peças metálicas cola epoxídica, extensão monofásica.

Pode-se medir a resistência à tração do betão ou aderência entre betões de idades diferentes. Para o primeiro caso, aplica-se uma força de arrancamento e regista-se a força máxima a que um carote não retirado rompe. No segundo caso, aplica-se uma força de arrancamento e observa-se a secção pela qual o provete rompeu. Se o destacamento ocorre pela superfície de ligação entre os materiais, trata-se de um arrancamento por aderência, se a superfície pertence a um dos materiais trata-se de um arrancamento por tração.

Tendo em conta o carácter superficial do ensaio, consideram-se os resultados pouco fiáveis.

- Ensaio de ultra-sons:

Através de um gerador de impulsos elétricos, circuito de leitura e transdutores é possível obter a velocidade de propagação dum impulso ultra-sónico entre dois pontos, a qual se relaciona com os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade no betão; tensão de compressão do betão; qualidade do betão (se existe fendas, vazios ou profundidade de fissuras). É conveniente realizar este ensaio em superfícies lisas.

- Ensaio de tensões:

Com o auxílio de uma rebarbadora e extensómetro, é possível verificar variações na leitura do extensómetro colocado nas armaduras, após o corte de um varão. Essa variação relaciona-se com a tensão instalada nas armaduras.

- Ensaio detetor de armaduras:

O equipamento utilizado neste ensaio é o pacómetro. Permite determinar a localização, direção e diâmetro das armaduras no interior do betão. Determina-se ainda a espessura do betão de recobrimento.

### **2.2.1.2. Ensaio estruturais em laboratório**

Para uma melhor obtenção de resultados, em simultâneo com os ensaios *in situ* desenvolvem-se este tipo de ensaios. É normal obter resultados relativamente diferentes, por isso devem ser confrontados uns com os outros. Dentro dos mais utilizados tem-se:

- Ensaio de rotura à compressão simples:

O equipamento pode ser diverso, portanto a decisão do que utilizar passa por um operador qualificado. O parâmetro medido é a tensão resistente à compressão simples do betão de um determinado de carotes recolhidos *in situ*. O número de carotes a recolher deverá fazer-se de acordo com o grau de representatividade pretendido.

- Ensaio módulo de elasticidade:

Mais uma vez, o equipamento usado é definido pelo operador que executa o ensaio em laboratório. Pretende-se determinar o módulo de elasticidade do betão a partir do registo das deformações e tensões axiais das amostras recolhidas quando submetidas a uma compressão elástica uniaxial.

- Ensaio de fluência:

Consegue-se obter o coeficiente de fluência. Os provetes de betão são submetidos a tensões de compressão constantes ao longo de vários meses, sob condições de temperatura e de humidade controladas. São registadas as deformações elásticas iniciais e as deformações em diversos instantes  $t$ .

- Ensaio de retração:

Obtém-se a deformação de retração em instantes  $t$ . Os provetes são submetidos a um estado de deformação livre num ambiente controlado. Em cada instante  $t$ , é possível

medir a deformação por retração (encurtamento) dos provetes, e assim aferir o efeito deste fenómeno.

#### **2.2.1.3. Ensaios de durabilidade *in situ*:**

Diferente dos ensaios estruturais, os ensaios de durabilidade têm como objetivo caracterizar as características dos materiais que influenciam a durabilidade da estrutura, como por exemplo a permeabilidade.

- Determinação da profundidade de carbonatação:

Utiliza-se berbequim, martelo e escopro, aspersor, régua graduada e uma solução alcoólica de fenolftaleína. O parâmetro medido é a profundidade das zonas de betão carbonatado. A medição realiza-se a partir da visualização da coloração das paredes internas de um furo realizado na superfície do betão junto a uma armadura, o qual foi previamente borrifado com um corante rosado (fenolftaleína). A zona não carbonatada permanece rosada enquanto que a zona carbonatada se torna incolor. É necessária uma prévia localização das armaduras e espessura do betão de recobrimento, garantindo desta forma que os furos não intercetem as armaduras.

- Determinação do teor de cloretos do betão:

Este procedimento permite medir a percentagem de iões de cloro presentes em amostras de pó de betão recolhidas *in situ* a partir da realização de 3 furos a profundidades diferentes (perto da superfície, ao nível das armaduras e 3 cm abaixo das armaduras). Também neste caso, é necessária uma localização prévia da posição das armaduras.

- Detetor de corrosão:

Descobre-se o potencial eléctrico da superfície de betão relativamente a um eléctrodo de referência. Desta forma identificam-se as áreas onde a corrosão está ou pode vir a estar presente.

- Medição da resistividade do betão:

O parâmetro determinado neste tipo de ensaio é a resistividade do betão nas áreas com grande probabilidade de corrosão.

Resistividades altas associam-se a taxas de corrosão baixas, e resistividades baixas indicam taxas de corrosão elevadas

- Determinação da permeabilidade do betão ao ar e à água:

A determinação da permeabilidade ao ar executa-se através de um furo no betão, o qual é tapado de seguida e com uma bomba de vácuo reduz-se a pressão do vácuo. Posteriormente mede-se o tempo que é necessário para a pressão do vácuo voltar ao valor inicial.

Já a determinação da permeabilidade à água realiza-se através de um furo no betão, o qual é tapado de seguida e injeta-se água no furo com o auxílio de uma seringa. Com o auxílio de outra instrumentação mede-se o tempo que o betão demora a absorver a água.

#### **2.2.1.4. Ensaios de durabilidade em laboratório**

De igual modo aos ensaios estruturais, estes ensaios em laboratório surgem paralelamente aos ensaios *in situ*. Este tipo de ensaios permitem uma caracterização bastante pormenorizada das características dos materiais que influenciam a durabilidade da estrutura.

- Ensaio de absorção de água por capilaridade:

Determina-se o coeficiente de absorção de água. Uma face dos provetes é colocada dentro de água (até 5mm) durante 4 horas, sendo que a área molhada vai aumentando ao longo do tempo. O coeficiente de absorção de água obtém-se através de uma relação entre a absorção de água por unidade de área e o tempo.

- Ensaio de difusão de cloretos:

Determina-se o coeficiente de difusão de cloretos. Existem duas maneiras de realizar este ensaio. Uma delas é colocar uma amostra de betão na fronteira entre duas câmaras, uma saturada com cloretos e outra sem cloretos. Após algum tempo, determina-se o coeficiente de difusão de cloretos através da medição de cloretos em ambas as câmaras. Outra maneira é colocar uma amostra de betão em água saturada com cloretos e, após algum tempo, determina-se a percentagem de cloretos na

amostra a diferentes profundidades. Com estes valores é possível determinar o coeficiente de difusão de cloretos.

- Ensaio de carbonatação acelerada:

Consegue-se saber a profundidade da carbonatação ao longo do tempo numa amostra de betão colocada numa câmara com ambiente controlado e com uma percentagem de CO<sub>2</sub> de 5%. A profundidade de carbonatação relaciona-se com o coeficiente de carbonatação a partir da lei da difusão.

## 2.2.2. Verificação de segurança

Para verificar a segurança, os elementos estruturais têm necessariamente que verificar os estados limites da estrutura.

O estado limite de uma estrutura é o ponto para o qual se considera que a estrutura fica prejudicada total ou parcialmente na sua capacidade de desempenhar as funções para a qual foi dimensionada. Para o dimensionamento de uma estrutura utilizam-se os estados limites de utilização (*Serviceability Limit States*, SLS) e os estados limites últimos (*Ultimate Limit States*, ULS).

Os estados limites últimos são situações limite que não deverão ocorrer nunca em termos probabilísticos de ocorrências das ações previstas e suas combinações. As estruturas são assim dimensionadas para que a probabilidade de ocorrência destes estados limites seja minimizada. Podem ser verificados numa estrutura, isoladamente ou em simultâneo a perda de equilíbrio do conjunto ou parte da estrutura considerada como corpo rígido; por ruína ou deformação excessiva, transformação do conjunto ou de parte da estrutura num mecanismo, rotura, perda de estabilidade da estrutura ou de parte da estrutura, incluindo apoios e fundações; ou rotura provocada por fadiga ou por outros efeitos dependentes do tempo (Cachim & Morais, 2013).

$$E_d \leq R_d \quad (3.1)$$

Em que:

$E_d$  é o valor de cálculo do efeito das ações, tal como um esforço ou um vetor representando vários esforços;

$R_d$  é o valor de cálculo de resistência correspondente.

A verificação dos estados limites de utilização deverá basear-se em critérios um pouco diferentes dos estados limites últimos, tal como as deformações que afetem o aspeto, o conforto dos utentes ou o funcionamento da estrutura, incluindo funcionamento de instrumentos e outras instalações pertencentes à estrutura, ou que danifiquem revestimentos ou elementos não estruturais. São tidas em conta nesta análise as vibrações que causem desconforto às pessoas ou que limitem a eficiência funcional da estrutura. Estas verificações ainda visam os danos que possam afetar negativamente o aspeto, a durabilidade ou o funcionamento da estrutura, tal como por exemplo a fendilhação excessiva (Cachim & Moraes, 2013).

Numa análise feita ao estado de uma estrutura existente, primeiramente verificam-se os estados limites últimos, e seguidamente é feita uma análise relativo ao estado limite de serviço pretendido para a estrutura, para averiguar a eventualidade de uma necessidade de reforço.

No capítulo 4, pretende-se avaliar apenas analiticamente elementos estruturais de betão armado, assumir-se-á que cada um desses elementos não verifica o estado limite último, portanto é necessária uma intervenção. O objetivo é estudar diferentes tipos de intervenções, para ser mais simples avaliar o melhor procedimento usando o aço como material de reforço.





# *Capítulo 3*

---

*Anomalias e manutenção nas  
estruturas existentes*



### **3. ANOMALIAS E MANUTENÇÃO EM ESTRUTURAS EXISTENTES**

Durante a execução de qualquer obra, ou durante a vida útil da mesma, é frequente observarem-se fenómenos anómalos que podem condicionar o desempenho estético ou funcional dos materiais constituintes, mas mais grave do que isso, é normal que essas anomalias possam ter implicações na funcionalidade do edifício ou na segurança estrutural (Correia, 2014)

Por vezes as anomalias estruturais, que são causadas por fenómenos que alteram a componente estrutural resistente de um edifício, causam anomalias em outros elementos não estruturais que estejam interligados por serem constituintes ou por estarem em contato direto com esses elementos. Portanto, é normal acontecerem situações em que uma anomalia estrutural, originada por algum fator adverso ou por um conjunto destes, possa provocar danos em elementos não estruturais, sendo que neste caso a execução de uma análise e diagnóstico exaustivo se torna fundamental para conseguir avaliar a origem das anomalias em questão e as suas repercussões (Costa, 2006). Tal como foi enunciado no esquema da figura 2 do capítulo 2.

Apresenta-se de seguida as anomalias mais frequentes no betão, que são fundamentais para conhecer o estado em que a estrutura se encontra antes de elaborar um reforço.

#### **3.1. Principais anomalias das estruturas de betão armado**

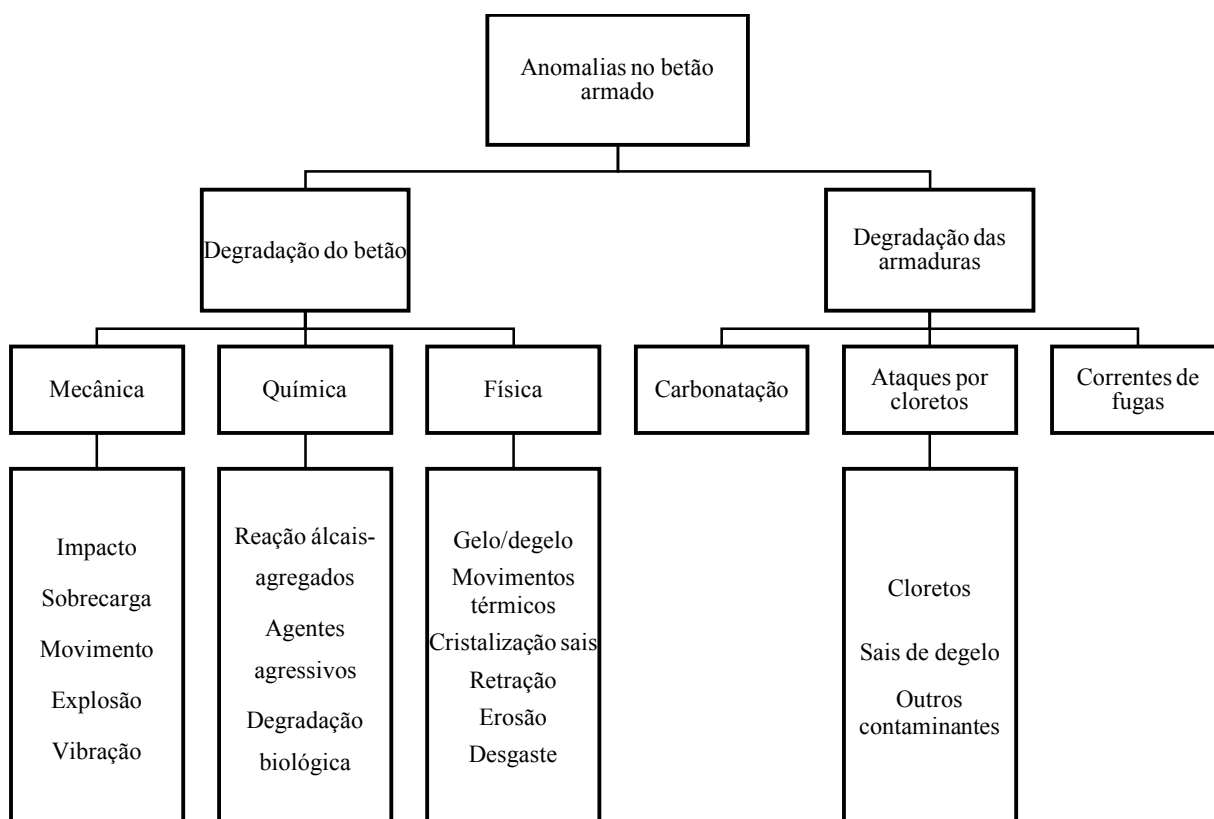
De um modo geral, os principais sintomas de deterioração das estruturas de betão são a fendilhação, delaminação, corrosão, desagregação do betão, erosão, infiltrações, eflorescências e deformações. Quando estamos perante este tipo de anomalias, pode ser encontrada uma estrutura de betão danificada com necessidade de reparação ou reforço (Moura, 2012).

A causa do aparecimento destas anomalias passa por erros/deficiências elaborados no projeto, execução, exploração ou manutenção. Além disso ocorrem muitas vezes deformações impostas devido à retração e temperatura e outras anomalias quando o

betão está sujeito a ações agressivas (físicas, químicas e biológicas). As lacunas mais frequentes são devido a (Moura, 2012):

- Especificação, seleção e fabrico inadequado do betão e cura mal efetuada;
- Deficiente pormenorização das armaduras e do posicionamento destas;
- Especificação deficiente dos recobrimentos das armaduras;
- Cofragens deficientes e remoção prematura do escoramento da cofragem;
- Deficiente avaliação das deformações impostas: retração (plástica, secagem e térmica) e temperatura;
- Deficiente controlo da fendilhação;
- Deficiente controlo da deformação;
- Cargas excessivas;
- Exposição de substâncias/ambientes agressivos para os quais a estrutura não foi projetada;

Como foi dito anteriormente, as patologias no betão armado podem também ser causadas por ações naturais. Na figura 3 apresentam-se as mais frequentes e as consequências segundo NP EN 1504-4.



**Figura 3 - Esquema das causas naturais de degradação do betão armado.**

Todas estas anomalias podem comprometer o funcionamento da estrutura. Esta poderá sofrer um défice na capacidade resistente, desempenhar um funcionamento inadequado ou apresentar deformações elevadas tal como fendilhação excessiva.

Portanto, pode ser necessário reforçar uma estrutura de betão sempre que haja erros ao nível de projeto e estabilidade, erros na composição/produção do betão ou até erros de execução. Existem ainda outras ocorrências que fazem ser necessário o reforço, tal como ocorrências de sismos, acidentes como choques, incêndios ou explosões, a modificação da função da estrutura para condições mais desfavoráveis, o agravamento dos requisitos regulamentares e alteração das exigências de serviço da estrutura (Moura, 2012).

De seguida apresenta-se imagens de algumas das patologias já enunciadas no betão armado:



**Figura 4 - Fendilhação do betão armado. Na figura à esquerda tem-se fendilhação originada por reações expansivas, enquanto que à direita, a fendilhação é originada por cargas (Costa, 2013).**

As principais preocupações no estado de uma estrutura recaem para as anomalias estruturais, pois são as que causam maiores perturbações ao funcionamento da estrutura, e são aquelas que possivelmente necessitam de serem reforçadas com elementos estruturais, e visto que este estudo contempla este tipo de reforços, debruça-se agora este tema mais aprofundadamente

### 3.1.1. Anomalias estruturais

As anomalias deste tipo, podem estar associadas a eventuais alterações das condições de utilização, à deterioração e à inadequação de materiais aplicados, assim como à deficiente conceção e à desajustada utilização de técnicas construtivas. Na tabela abaixo apresenta-se uma síntese das causas que provocam anomalias estruturais:

**Tabela 3 - Causas das anomalias em elementos estruturais (adaptado de Correia, 2006).**

<b>CAUSAS DAS ANOMALIAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS</b>		
<b>Erros ou insuficiências originais</b>	<b>Alterações estruturais e das condições de utilização</b>	<b>Alterações dos materiais</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deficiente conceção ou dimensionamento;</li> <li>- Escolha inadequada de materiais;</li> <li>- Erros de execução em obra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteração da estrutura;</li> <li>- Agravamento das cargas permanentes, com ou sem introdução de excentricidade de carregamento;</li> <li>- Agravamento sobrecargas de utilização;</li> <li>- Assentamentos diferenciais das fundações;</li> <li>- Efeito das variações da temperatura ambiente;</li> <li>- Sismos, raios, escorregamento de talude;</li> <li>- Vibrações induzidas na estrutura pela utilização de explosivos na envolvente do edifício.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deterioração dos materiais, ao longo do tempo.</li> </ul>

As anomalias nas estruturas de betão armado manifestam-se essencialmente na fase de utilização, pela ocorrência de (Aguilar et al, 2006):

- Fendilhação com diversa orientação;
- Deformações excessivas, normalmente em pavimentos;
- Corrosão das armaduras, ou desagregação nas superfícies por ataque químico ou físico.

Estes tipos de anomalias, que causam a deterioração dos materiais, requerem sempre uma análise profunda, de modo a, ao executar um reforço, este seja capaz de colmatar todas as deficiências existentes.

### **3.1.1.1. Fendilhação**

A fendilhação em estruturas de betão armado encontra-se associada a fenómenos ocorridos na fase anterior e/ou posterior do endurecimento das mesmas. As fendas de retração decorrem do facto de, numa determinada peça ou zona, a retração ser impedida de se processar livremente, devido a restrições internas associadas ao próprio betão armado ou a externas pela ligação a outros elementos, em contraste com as fendas de origem térmica que são associadas à livre dilatação (ou contração) dos elementos estruturais por variação de temperatura (Aguilar et al, 2006).

A fendilhação que resulta de esforços aplicados em elementos de betão armado apresenta, em regra, configurações associáveis ao funcionamento estrutural, sendo por essa razão possível identificar o tipo de esforço que a origina. A norma NP EN 1993-1-1:2004, diz que para ambientes pouco a moderadamente agressivos, a largura admissível para as fissuras varia entre 0,2 e 0,4 mm.

Na seguinte tabela enumeram-se as possíveis causas de fissuração em betão armado:

**Tabela 4 - Representação das diversas causas de fissurações em betão armado (Cóias, 2006).**

<b>TIPOS DE FISSURAS NO BETÃO ARMADO</b>					
<b>Antes do endurecimento</b>		<b>Depois do endurecimento</b>			
<b>Movimentos durante a construção</b>	<b>Efeito plástico</b>	<b>Efeito estrutural</b>	<b>Efeito térmico</b>	<b>Efeito químico</b>	<b>Efeito físico</b>
- Movimento do terreno; - Movimento dos moldes.	- Retração plástica; - Assentamento plástico.	- Deformações impostas; - Cargas de projeto; - Fluência; - Sobrecarga acidental.	- Contração térmica; - Variações sazonais; Ciclos gelo-degelo.	- Carbonatação do cimento; Reação alcali-agregado; - Corrosão das armaduras.	- Fissuração mapeada; - Retração de secagem; - Agregados retrateis

### 3.1.1.2. Deformações excessivas

As razões para controlar a deformação das estruturas de betão são variadas. A limitação da deformação de uma estrutura ou elemento estrutural deve ser realizada para que não prejudique o seu aspeto ou funcionamento. Além disso, as deformações não deverão exceder os valores compatíveis com as deformações de outros elementos ligados à estrutura (divisórias, envidraçados, revestimentos etc.). Outra razão para o controlo da deformação pode ser a necessidade de garantir o correto funcionamento de máquinas ou de aparelhos suportados pela estrutura, ou de evitar a acumulação de águas pluviais em coberturas planas (Cachim & Morais, 2013).

Os elementos de betão armado mais sujeitos a deformações excessivas são as lajes, encontrando-se estas anomalias associadas ao funcionamento por flexão. Contudo, na maioria das circunstâncias, os efeitos secundários destas anomalias surgem em elementos não estruturais, que possuem capacidade de deformação interior (Correia, 2014).

Existe um grande conjunto de fatores que afetam a deformação de um elemento ou estrutura. Estes fatores estão muitas vezes inter-relacionados e são dependentes do



tempo, pelo que o cálculo da deformação é bastante complexo. A resistência do betão à tração desempenha um papel fundamental no comportamento em serviço do betão, uma vez que, quando a tensão de tração ultrapassa este valor, o betão fendilha (Cachim & Morais, 2013). É natural que, num elemento de betão resistente, devido às anomalias ao qual está sujeito, que o material perca algumas das funcionalidades, e que, ao longo do tempo, o valor de resistência do betão à tração não seja o mesmo que quando ele foi confeccionado. É aqui que reside a principal importância dos reforços, pois oferece uma maior distribuição de tensões, o que permite que o betão permaneça com as características resistentes suficientes para que permaneça nas mínimas capacidades.

Também o efeito da fluência tem bastante significado na análise de deformações excessivas pois o seu efeito traduz-se por um aumento das extensões sob tensão constante.

### **3.1.1.3. Corrosão de armaduras**

A corrosão das armaduras é um dos defeitos mais frequentes das construções de betão armado, resultando da carbonatação de  $\text{CO}_2$  com o conseqüente abaixamento de pH do betão, do seu efeito protetor e da presença de cloretos do betão que envolve as armaduras. Estas causas podem ser agravadas pela presença de fissuras ou defeitos de compacidade, que permitem a penetração de agentes agressivos, pelo recobrimento insuficiente. Ainda assim, a taxa de carbonatação é uma variável que depende de vários fatores, especialmente da permeabilidade do betão e da humidade relativa (Cóias, 2006).

A qualidade do betão, as condições de exposição, assim como o tempo de exposição dos elementos de betão, influenciam a evolução dos valores do coeficiente de cloretos. Por exemplo, as estruturas de betão armado localizadas em meios próximos de ambientes marítimos encontram-se em situações mais oportunas de sofrer corrosão de armaduras provindo do ataque de cloretos. Porém, os iões cloreto poderão encontrar-se no ligante aplicado no betão armado, devido à utilização de areias inadequadas no mesmo.

No entanto, a medida de recobrimento e o estado de conservação superficial dos elementos construtivos do betão armado, influenciam a progressão da penetração dos cloretos nos elementos em questão. No que diz respeito à medida de recobrimento, este agente não dificulta a penetração dos cloretos no betão armado, apenas prolonga o período inicial de entrada dos cloretos no betão (Appleton, 1999).

### **3.2. Proteção e reparação de estruturas de betão**

Após estabelecidos os principais problemas e causas das anomalias nos elementos estruturais de betão armado, destina-se agora este subcapítulo aos procedimentos regulamentares de proteção e reparação de estruturas.

A reparação de estruturas de betão é uma área em que a normalização é escassa e a existente tem sofrido constantes atualizações. Nas últimas três décadas o Comité Europeu de Normalização (CEN) tem desenvolvido esforços no sentido de preparar normas completas e adequadas a este tipo de intervenção.

A norma EN 1504 (2004) reúne a informação sobre os produtos e sistemas para proteção e reparação de estruturas de betão. É um recurso que auxilia projetistas, empreiteiros, e empresas fabricantes. Esta proporciona um maior nível de confiança ao dono-de-obra já que, pela primeira vez, todas as questões relacionadas com a reparação e proteção de betão são abrangidas por uma norma Europeia única e integrada.

A norma está dividida em 10 partes, dividindo os temas da reparação pelas diferentes partes, a tabela 5 descreve cada um dos títulos:

Tabela 5 - Definição da divisão das partes da Norma Europeia 1504.

NÚMERO DO DOCUMENTO	DESCRIÇÃO
EM 1504- 1	Descreve os termos e definições compreendidos na norma
EM 1504- 2	Fornece especificações para produtos/sistemas de proteção superficial do betão
EM 1504- 3	Fornece especificações para a reparação estrutural e não-estrutural
EM 1504- 4	Fornece especificações para a colagem estrutural
EM 1504- 5	Fornece especificações para injeção do betão
EM 1504- 6	Fornece especificações para a ancoragem de armaduras
EM 1504- 7	Fornece especificações para a proteção contra a corrosão das armaduras
EM 1504- 8	Descreve o controlo de qualidade e avaliação da conformidade das empresas fabricantes
EM 1504- 9	Define os princípios gerais para o uso de produtos e sistemas, na reparação e proteção do betão
EM 1504- 10	Fornece a informação sobre a aplicação e controlo da qualidade dos trabalhos



# *Capítulo 4*

---

*Tipologias de reforço em estruturas de  
betão armado com chapas metálicas*



## **4. TIPOLOGIAS DE REFORÇO EM ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO COM CHAPAS METÁLICAS**

Como já descrito anteriormente, nesta dissertação pretende-se elaborar o estudo de reforços por adição de chapas metálicas aos elementos de betão armado. Até agora foi explicada a importância da análise às anomalias em estruturas de edifícios existentes, completando esta informação com normas de proteção a estes elementos. Esta análise é o que permite concluir da necessidade de reforço, e do tipo de reforço mais apropriado. Parte-se agora do princípio que se pretende reforçar elementos de betão armado que não verificam os estados limites, com chapas metálicas.

Neste capítulo abordam-se diferentes tipologias de reforço. Para isso, dividir-se-á por diferentes subcapítulos os elementos de betão armado, que sofram esforços condicionantes de flexão e esforço transversal utilizando vigas como exemplo, e de esforço axial utilizando pilares como exemplo. Estes tipos de esforços foram os escolhidos para esta análise por serem os mais simples de considerar nesta primeira abordagem. Esta simplicidade torna mais intuitivo o modo de proceder à escolha da geometria e de posicionamento da chapa na secção do elemento estrutural. É também pela facilidade de caracterização do comportamento da secção, que se pode determinar qual o tipo de abordagem que permite desenvolver técnicas de auxílio da decisão de reforço.

Em cada um dos subcapítulos irá ser feita uma descrição de diferentes possibilidades de reforço, tendo como objetivo a determinação da área de aço a usar em cada uma das soluções, de maneira a verificar as condições de segurança, logo após serem descritas algumas considerações iniciais acerca deste estudo.

## 4.1. Considerações iniciais

### 4.1.1. Utilização do aço como material de reforço

Pelas razões já descritas no capítulo 1, no estudo levado a cabo nesta dissertação, opta-se pela utilização do aço como material de reforço. Como tal, será feita uma breve descrição acerca da utilização deste material na construção.

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens de carbono variando entre 0,008 e 2,11%. As principais propriedades do aço são grande maleabilidade, durabilidade, elasticidade, boa resistência e boa condutividade térmica. Desde o início da utilização de estruturas metálicas na construção civil, o aço tem possibilitado a todas as entidades projetistas e construtoras soluções mais arrojadas, mais eficientes e de maior qualidade (Castro, 1999).

O aço, sendo correntemente um dos principais materiais usados no mercado da construção civil, apresenta inúmeras vantagens (Premonta, 2015):

- Alta resistência do material nos diversos estados de solicitação: tração, compressão, flexão, etc. o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar das dimensões relativamente pequenas dos perfis que os compõem;
- Apesar da alta massa específica do aço, na ordem dos  $78,50 \text{ kN/m}^3$ , as estruturas metálicas são mais leves do que, por exemplo, as estruturas de betão armado, proporcionando assim, fundações menos onerosas;
- As propriedades dos materiais oferecem grande margem de segurança, em vista do seu processo de fabricação que proporciona material único e homogéneo, com rutura e módulo de elasticidade bem definidos;
- As dimensões dos elementos estruturais oferecem grande margem de segurança, pois por terem sido fabricadas em oficinas, são seriados e a sua montagem é mecanizada, permitindo prazos mais curtos de execução de obras
- Apresenta possibilidade de desmontagem da estrutura e seu posterior reaproveitamento em outro local;



- Apresenta possibilidade de maior reaproveitamento de material em *stock*, ou mesmo, sobras de obra, permitindo emendas devidamente dimensionadas, que diminuem as perdas de materiais, em geral corrente em obras;
- O aço é o único material que pode ser 100% e indefinidamente reciclado sem qualquer perda de qualidade, e essa elevada taxa de reciclagem, reduz os seus impactos ambientais de 40%.

Estes pontos são aplicáveis ao aço para uso como material de construção, tal como material de reforço. Considera-se como um material eficiente no âmbito de introduzir resistência a diferentes tipos de elementos de betão armado, cujos estados de deterioração estejam elevados.

### 4.1.2. Interação entre as chapas metálicas e os elementos de betão armado

O resultado final da aplicação das chapas metálicas nos elementos de betão armado traduz a existência de uma estrutura mista.

O betão permite uma fácil adaptação a superfícies e volumes, com tons variados e a sua resistência à compressão tem grande vantagem ser associada ao aço, cuja melhor característica é a resistência à tração.

Pode-se então entender que a interação entre o aço estrutural e o betão permite obter elementos estruturais com comportamento diferente dos materiais usados individualmente. Este facto possibilita uma grande variedade de soluções estruturais e métodos construtivos. O perfeito conhecimento do comportamento das estruturas e dos elementos estruturais mistos é fundamental para a sua análise e dimensionamento, já que os conceitos que lhes estão subjacentes não são, de um modo geral, referidos na regulamentação diretamente aplicável (Lopes, 2009)

As vantagens da utilização deste tipo de material como reforço em elementos de betão armado são várias, de entre as mais importantes tem-se (Campos, 2006)

- Oferecem variadas possibilidades em termos arquitetónicos, e têm grande facilidade de construção em curto espaço de tempo;
- Podem adaptar-se facilmente para substituir outras estruturas e, tendo em conta o seu peso reduzido, permite aproveitar os apoios existentes;
- São flexíveis porque podem ser adaptadas em qualquer momento e com baixo custo a novas exigências, indicadas para profundidades de construção restringidas;
- São de fácil manutenção, pois as componentes estruturais estão em zonas de fácil acesso para inspeção e conservação.

#### 4.1.3. Principais anomalias dos elementos de reforço

Como foi dito anteriormente, os materiais não são infinitamente duráveis, são constantemente sujeitos a ações externas, e naturalmente ocorrem certas anomalias.

A aplicação de um material de reforço necessita não só de um prévio estudo acerca das características resistentes que acrescentará ao elemento reforçado, mas também às possíveis anomalias que o elemento final ficará exposto. Ou seja, algumas das patologias que tem o aço passarão a estar associadas ao elemento reforçado. É, portanto, conveniente o estudo das anomalias às quais o aço está vulnerável, e analisar a possibilidade de agravamento das condições do betão que está a ser reforçado.

De entre as anomalias mais frequentes no aço destacam-se (Castro, 1999):

- Corrosão localizada: causada por deficiência de drenagem das águas pluviais e deficiências de detalhes construtivos, permitindo a acumulação de humidade e agentes agressivos;
- Corrosão generalizada: causada pela ausência de proteção contra o processo de corrosão;
- Deformações excessivas: causadas por sobrecargas ou efeitos térmicos não previstos no projeto original, ou ainda deficiências na disposição de travejamentos;

- Encurvadura local ou global: causados pelo uso de modelos estruturais incorretos para a verificação da estabilidade, ou deficiências no enrijecimento local de chapas, ou efeitos de imperfeições geométricas não considerados no projeto e cálculo;
- Fratura e propagação de fraturas: falhas estas iniciadas por concentração de tensões, devido a detalhes de projeto inadequados, defeitos de solda, ou variações de tensão não previstas no projeto.

Posto isto, verifica-se que os cuidados a ter após a aplicação de um reforço têm de ser redobradas, pois as anomalias entre as interações entre os dois materiais podem ser desastrosas, visto que o betão reforçado provavelmente estará mais vulnerável a ser prejudicado a fenómenos de fendilhação, deformações excessivas e corrosão.

### 4.1.4. Descrição técnica

O conceito desta aplicação de reforço, por adição de chapas metálicas consiste na colocação destas na superfície do elemento a reforçar, fixas ao betão por colagem e/ou através de buchas.



**Figura 5 - Adição de chapas metálicas a elementos de betão armado (STAP, 2016)**

Devido à facilidade e rapidez de execução, à pequena perturbação nas dimensões arquitetónicas e ao facto de recorrer a materiais correntes, esta técnica tem vindo a ser aplicada crescentemente no reforço de estruturas desde os anos 60 do século passado (Sousa, 2008). No entanto, com a utilização de chapas de aço aplicadas

exteriormente ao betão, aumenta-se a vulnerabilidade da estrutura à ação do fogo e à corrosão. Para além destes dois fatores, indicam-se ainda como desvantagens desta técnica a dificuldade de manuseamento das chapas metálicas devido ao seu peso, à limitação do comprimento das chapas e o custo dos ligantes (Simões, 2007).

As chapas metálicas poderão ser ligadas à superfície do betão por colagem com resina epóxi e complementarmente por buchas metálicas. Tendo em conta a extrema importância desta ligação na efetividade do reforço, considera-se indispensável a preparação das superfícies dos dois elementos a ligar, a qual inclui, resumidamente, as seguintes etapas (Appleton & Gomes, 1999):

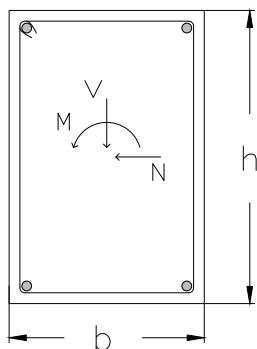
- Tratamento da superfície do betão:
  - i) Limpeza de impurezas depositadas com auxílio de jato de água;
  - ii) Remoção do betão deteriorado;
  - iii) Aumento da rugosidade da superfície com auxílio de martelo de agulhas.
- Tratamento das chapas:
  - i) Decapagem das chapas após fabrico;
  - ii) Colocação de película plástica para o seu transporte e manuseamento;
  - iii) Remoção da película plástica e limpeza da chapa para remoção de óleos e gorduras;
  - iv) Decapagem das chapas após fabrico.

Nas chapas de aço que são coladas ao betão armado através de resina epóxi, na maior parte dos casos, para elevar os níveis de confiança relativamente ao comportamento monolítico da seção mista, fixa-se a chapa de aço ao betão através de buchas metálicas (Sousa, 2008).

Nesta dissertação não se vai proceder à pormenorização do cálculo de como deve ser feita as ligações dos parafusos que fazem a conexão entre a chapa de reforço e o betão, que apesar de ser um elemento importante na transmissão dos esforços entre os dois materiais, não é através deles que se pretende fazer o dimensionamento de reforço às vigas. É, no entanto, fulcral uma análise minuciosa ao dimensionamento dos parafusos usados no reforço.

## 4.2. Elementos sujeitos à flexão

Passando agora à análise teórica das tipologias de reforço em vigas, define-se como exemplo de estudo uma viga simplesmente apoiada. Far-se-á um estudo a diferentes maneiras de reforço consoante os esforços para os quais as vigas normalmente são limitadas: momento fletor ( $M$ ) e esforço transversal ( $V$ ) associado. Geometricamente considera-se que a secção da viga tem altura  $h$ , e largura  $b$ .



**Figura 6 - Secção transversal de uma viga sujeita a momento fletor ( $M$ ), esforço transversal ( $V$ ), e esforço axial ( $N$ ).**

### 4.2.1. Reforço de uma viga à flexão

Considerando uma viga sujeita à flexão simples, é bastante intuitivo que a maneira mais correta de proceder ao reforço por chapas metálicas ou adição de perfis, é a sua colocação na parte inferior da secção, visto que na maioria das vezes a parte tracionada da secção é a parte inferior na viga, ou seja, é a zona que mais cedo perde as propriedades resistentes. É o caso da viga simplesmente apoiada, que tem apenas momentos positivos, sendo o máximo a meio vão.

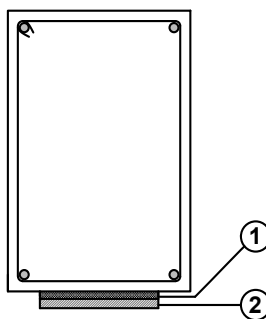
Na verificação de segurança, é ainda necessário ter em conta que a secção pode estar ou não fendilhada. Isto porque estando parte da secção fendilhada, a contribuição da resistência dessa área fendilhada é praticamente nula. É então necessário, caso a secção se encontre fendilhada, que se calcule a profundidade do eixo neutro, e posteriormente fazer de novo a verificação de segurança apenas com a área não fendilhada.

Não estando reunidas as condições de segurança, ter-se-á que se proceder ao reforço da viga.

Como dito anteriormente, nesta análise da secção transversal para uma viga simplesmente apoiada, a deficiência será na parte inferior, onde a secção provavelmente se encontrará com fendas devidas à tração existente nessa zona. Portanto será nessa zona onde incidirá a área de aço de reforço.

### 4.2.1.1. Disposições construtivas

De seguida, expõe-se algumas tipologias e recomendações que se podem adotar nas secções reforçadas ao momento fletor.

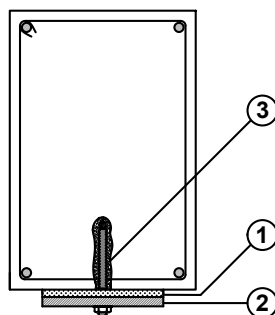


**Figura 7 – Tipologia 1: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica.**

Esta solução apenas não é aconselhável, porque a ligação é feita apenas por colagem através da resina epóxi, e pode não ser suficiente na transmissão dos esforços. A vantagem de não ser utilizada bucha metálica é que, caso o betão esteja bastante danificado, o uso de buchas metálicas não compromete ainda mais a pouca resistência a sua resistência.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi  $< 2$  mm;
- Espessura chapa metálica  $< 4$ mm;
- Largura chapa metálica  $> 50$  mm.

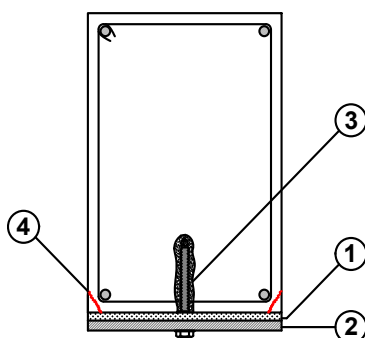


**Figura 8 - Tipologia 2: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 - bucha metálica.**

Partindo do princípio que o betão da seção transversal está em condições de satisfazer os requisitos da ligação bucha metálica-betão, esta solução é apropriada quando apenas se quer reforçar as lacunas da viga à flexão sem ser necessário uma elevada quantidade de área de aço.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 12mm;
- Largura chapa metálica > 80 mm.



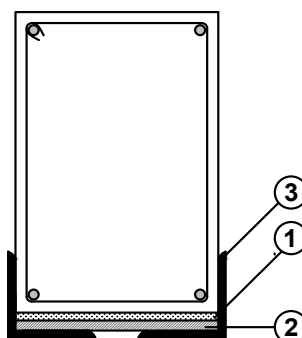
**Figura 9 - Tipologia 3: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 - bucha metálica; 4 – fissuração no betão.**

Esta solução é em tudo semelhante ao exemplo anterior. Apenas muda a largura da chapa metálica de reforço. É frequente este tipo de erro acontecer, pois na

intervenção, ao querer aproveitar ao máximo a largura da secção transversal de betão, acaba-se por criar fendilhação (na figura 9 a vermelho), nas extremidades da secção.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 12mm;
- Largura chapa metálica = largura da secção de betão armado.



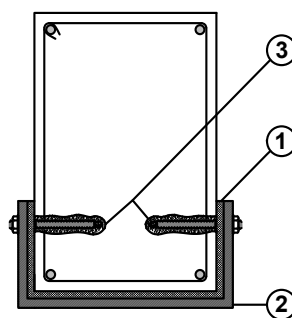
**Figura 10 - Tipologia 4: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – cantoneira de aço.**

Esta solução permite a utilização de mais área de chapa metálica por secção transversal de betão armado, e as próprias cantoneiras de aço fornecem ainda mais resistência. A ligação entre as cantoneiras e a chapa metálica pode eventualmente ser soldada ou aparafusada como nos exemplos anteriores.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 12mm;
- Largura chapa metálica = largura da secção de betão armado;
- Utilização de perfis (de cantoneiras) pré-existent.



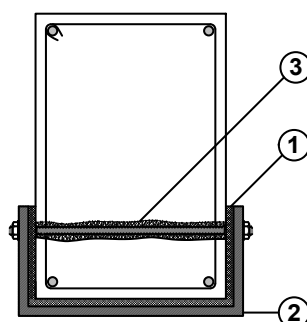


**Figura 11 - Tipologia 5: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – buchas metálicas.**

No caso da área de aço não ser suficiente para verificar as condições de segurança, a chapa metálica pode tomar outra geometria, de modo a fornecer mais resistência à flexão simples, à qual a seção transversal de betão está solicitada. Neste exemplo, optou-se por ilustrar um tipo de reforço com duas buchas metálicas para fortalecer a ligação do reforço com a viga.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 12mm;
- Largura chapa metálica = largura da seção de betão armado;
- Altura da chapa metálica < metade da altura da seção de betão armado.



**Figura 12 - Tipologia 6: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 - chapa metálica; 3 – bucha metálica.**

Este exemplo difere do anterior apenas na ligação feita entre as chapas metálicas e o betão armado. Esta solução apresenta uma ligação mais efetiva, pois conecta os dois lados onde há chapa metálica.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi  $< 2 \text{ mm}$ ;
- Espessura chapa metálica  $< 12 \text{ mm}$ ;
- Largura chapa metálica = largura da seção de betão armado;
- Altura da chapa metálica  $<$  metade da altura da seção de betão armado.

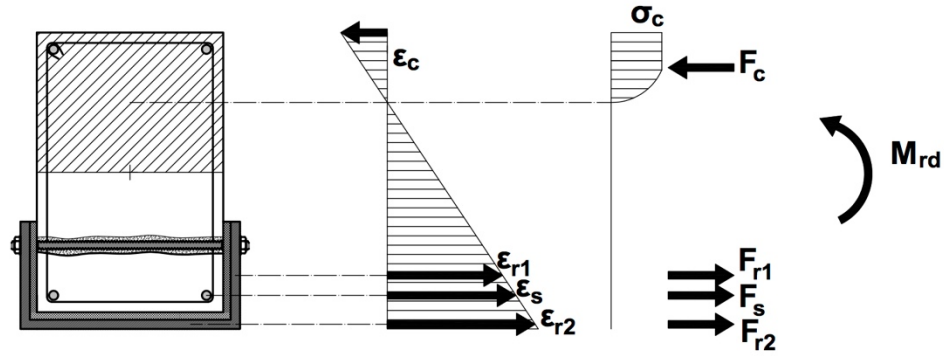
Os exemplos anteriores pretendem demonstrar de forma generalizada, possíveis atribuições de resistência ao elemento de betão armado. No entanto, conforme a contextualização do elemento na estrutura, adaptações terão de ser feitas, e para cada caso, escolher a intervenção mais rentável na relação preço-qualidade tendo em conta sempre a facilidade da sua aplicação.

#### **4.2.1.2. Dimensionamento**

Neste ponto descrever-se-á brevemente quais os procedimentos de dimensionamento para reforços resistentes à flexão.

Considera-se que metade da seção do betão está a contribuir para a resistência à compressão, o que na verdade não acontece, pois parte-se do princípio que se um elemento estrutural necessita de reforço, é porque a seção transversal da viga de betão armado está fendilhada e é normal que menos de metade da seção esteja a contribuir para a resistência à compressão. No entanto, para explicar o procedimento de cálculo, considera-se o eixo neutro coincidente com o centro de gravidade da secção.

Tomando como exemplo a tipologia 6 para descrever de que modo se faz o dimensionamento da chapa metálica, tem-se o diagrama de esforços, forças e tensões da seguinte forma:



**Figura 13 - Modelo de cálculo de viga à flexão com reforço através de chapa metálica para a tipologia 6.**

Através das equações de equilíbrio de momentos, poder-se-á obter uma relação com a área de reforço necessária para verificar a segurança ao momento fletor atuante. Admitindo ainda a altura lateral da chapa de reforço como 1/3 da altura total da seção transversal de betão armado:

$$M_{sd} < M_{rd} = \frac{h}{2} \cdot F_{r1} + \left( \frac{2h}{3} + e_e + \frac{e_r}{2} \right) \cdot F_{r2} + \left( \frac{2h}{3} - c_{mec} \right) \cdot F_s - \frac{h}{6} \cdot F_c \quad (4.1)$$

Em que:

$h$  é a altura da seção transversal de betão armado

$c_{mec}$  o recobrimento mecânico da armadura longitudinal;

$e_r$  espessura da chapa metálica;

$e_e$  espessura da resina epóxi.

Sabendo que:

$$F_c = A_c \cdot \sigma_c \quad (4.2)$$

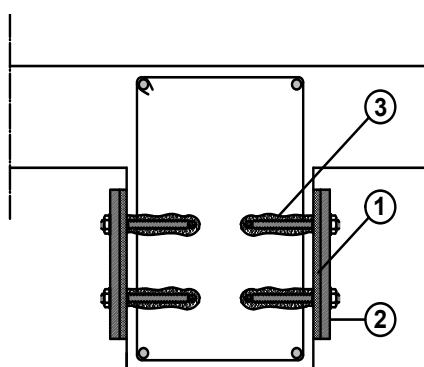
$$F_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (4.3)$$

$$F_r = A_r \cdot \sigma_r \quad (4.4)$$

Conhecendo as propriedades geométricas da seção transversal ( $h$  e  $b$ ) e a espessura da resina epóxi, tal como as tensões resistentes do betão existente e do aço da chapa metálica, pode-se resumir a equação 2.2 à incógnita da espessura da chapa de reforço, limitando-a pelo momento fletor atuante.

#### 4.2.2. Reforço de uma viga ao esforço transversal

No caso em que o esforço transversal é o mais condicionante numa viga, a maneira de reforçar poderá ser ligeiramente diferente. No dimensionamento ao esforço cortante utilizam-se armaduras transversais na alma das vigas (que se designam por estribos) para evitar a rotura. A rotura por esforço transversal é uma rotura frágil, sem aviso prévio e, por vezes, catastrófica (Cachim & Morais, 2013). Toda a área de reforço na seção contribui para a resistência de esforço transversal. E, portanto, sugere-se que o reforço seja feito de diferente modo:

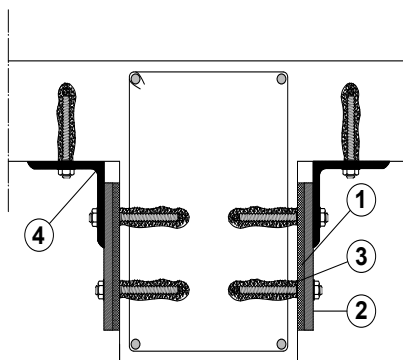


**Figura 14 - Tipologia 7: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica.**

Esta solução é recorrente nos casos de ter excesso de esforço transversal localizados na viga. Tal como no exemplo da flexão, não é aconselhável executar o reforço apenas com resina epóxi para a ligação. Os parafusos metálicos apesar de danificarem mais a seção de betão armado, oferecem mais confiança na transmissão dos esforços.

Recomendações (Appleton, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 4mm;
- Altura da chapa metálica > 100 x espessura (mm).

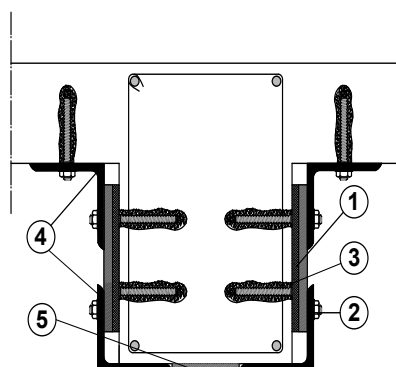


**Figura 15 - Tipologia 8: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica; 4 – cantoneira de aço.**

Neste exemplo tem-se uma cantoneira fixa à face interior da laje por intermédio de buchas, e a chapa metálica contínua na face da viga. Esta solução tem como inconveniente o manuseamento das chapas e a grande área de superfície de betão a tratar.

Recomendações:

- Espessura resina epóxi  $< 2$  mm;
- Espessura chapa metálica  $< 4$ mm;
- Altura da chapa metálica  $> 100 \times$  espessura (mm).



**Figura 16 - Tipologia 9: representação da secção transversal da viga reforçada. Legenda: 1 – resina epóxi; 2 – chapa metálica; 3 – bucha metálica; 4 – cantoneira de aço; 5 - chapa metálica**

Esta tipologia apenas trás acréscimo de resistência relativamente à anterior através da quantidade de área inserida. Mais uma vez há uma cantoneira fixa à face interior da laje por intermédio de cantoneiras e ligada ao nível da face interior da laje por

buchas metálicas, a diferença está na chapa metálica, é descontínua, sendo distribuída pelas três faces da viga.

Esta solução oferece também resistência à flexão, pois como falado anteriormente, a posição do reforço na face inferior da viga oferece mais resistência ao momento fletor.

Recomendações (Appleton & Gomes, 1999):

- Espessura resina epóxi < 2 mm;
- Espessura chapa metálica < 4mm;
- Altura da chapa metálica > 100 x espessura (mm).

#### 4.2.2.1. Dimensionamento

Este cálculo faz-se recorrendo ao modelo das bielas de inclinação variável, juntando a contribuição para a resistência dos novos estribos adicionados sob a forma de barras ou chapas continuas conforme representado nos exemplos anteriores.

Esforço transversal máximo,  $V_{Rd,max}$ :

$$V_{sd} \leq V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_j \times z \times v \times f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (4.5)$$

Esforço transversal resistente de cálculo,  $V_{Rd,s}$ :

$$V_{sd} \leq V_{Rd,s} = \gamma_{n,R} \times \left( z_i \times \frac{A_{sw}^i}{s} \times \cot\theta \times f_{yd}^i \right) + \gamma_{n,R} \times \left( z_r \times \frac{A_{sw}^r}{s} \times \cot\theta \times f_{yd}^r \right) \quad (4.6)$$

Em que:

$\gamma_{n,R} = 0,90$  é o coeficiente de monolitismo (Appleton & Gomes, 1999);

$A_{sw}^i$  área da secção transversal das armaduras de esforço transversal;

$A_{sw}^r$  área da secção transversal da chapa de reforço;

s é o espaçamento longitudinal;

$f_{yd}^i$  corresponde ao valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal;

$f_{yd}^r$  corresponde ao valor de cálculo da tensão de cedência da chapa de reforço;

$z_i$  e  $z_r$  são o braço binário das forças interiores, para um elemento de altura constante, correspondente ao momento fletor no elemento considerado. Das armaduras de esforço transversal e da chapa metálica respetivamente.

### 4.3. Elementos sujeitos ao esforço axial

Neste tipo de esforços, a projeção do reforço poderá ser diferente. O esforço axial pode ser de compressão, ou tração. No caso dos pilares de betão, que são os elementos de betão armado que mais frequentemente estão sujeitos a esforços axiais, é normal que o dimensionamento tenha sido feito para resistir essencialmente à compressão, visto existir sempre intencionalidade de aproveitar a boa resistência do betão a este tipo de solicitação. No entanto, existe sempre casos, em que os pilares de betão armado também estejam tracionados. Esses casos são mais críticos, pois a tensão de resistência à tração é muito mais baixa do que a compressão.

À semelhança do subcapítulo anterior, em que se usou uma viga genérica para os esforços de flexão, procura-se neste caso, ir também ao encontro das situações mais recorrentes nos edifícios existentes.

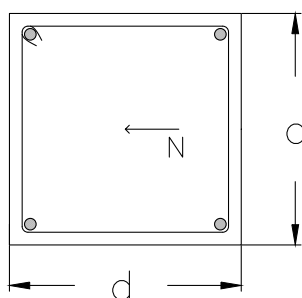


Figura 17 - Secção transversal de um pilar sujeita a esforço axial (N).

#### 4.3.1. Reforço de um pilar à compressão simples

Considera-se para este caso um pilar sujeito à simples, não considerando os efeitos de segunda ordem causados pela encurvadura. Sabe-se, no entanto que, em estruturas de betão armado, não é corrente o aparecimento de peças sujeitas apenas

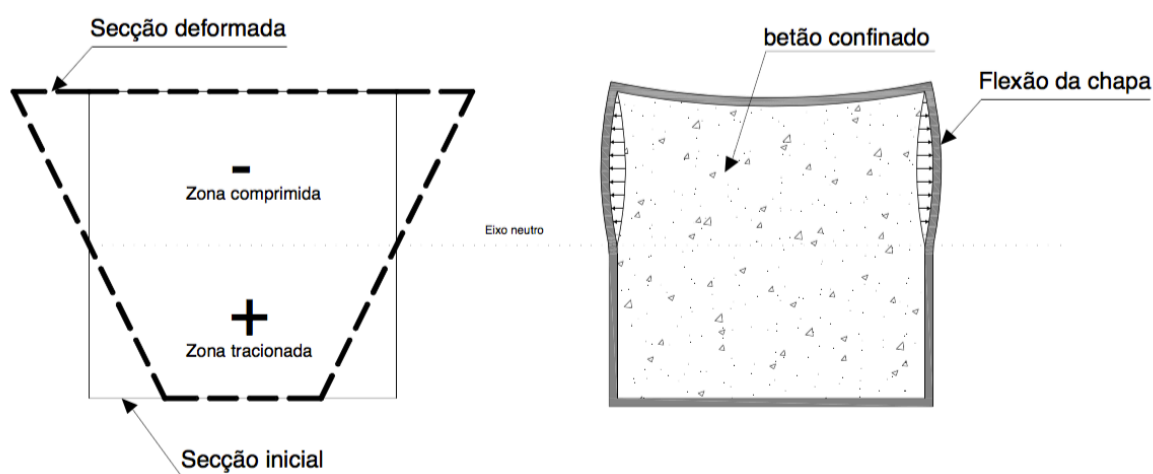
à compressão simples devido a inevitáveis excentricidades dos esforços normais ou à continuidade com outros elementos (Rocha, 2011).

#### 4.3.1.1. Disposições construtivas

A técnica de reforço mais utilizada neste tipo de condicionantes é o encamisamento (*Steel Jacketing*). Aplica-se sobretudo ao reforço de pilares e consiste no envolvimento da secção deste por chapas metálicas. Esse envolvimento poderá ser total ou apenas em secções críticas que se pretendam reforçar (como por exemplo nós de pórticos, zonas de emenda de varões, entre outras).

A introdução de chapas de aço nas faces dos pilares permite o aumento da resistência à flexão e ao esforço transversal por adição de armadura existente, garante um aumento da rigidez e da ductilidade do elemento reforçado, e por fim, proporciona um incremento da resistência à compressão do betão por confinamento das chapas (Andrade, 2015).

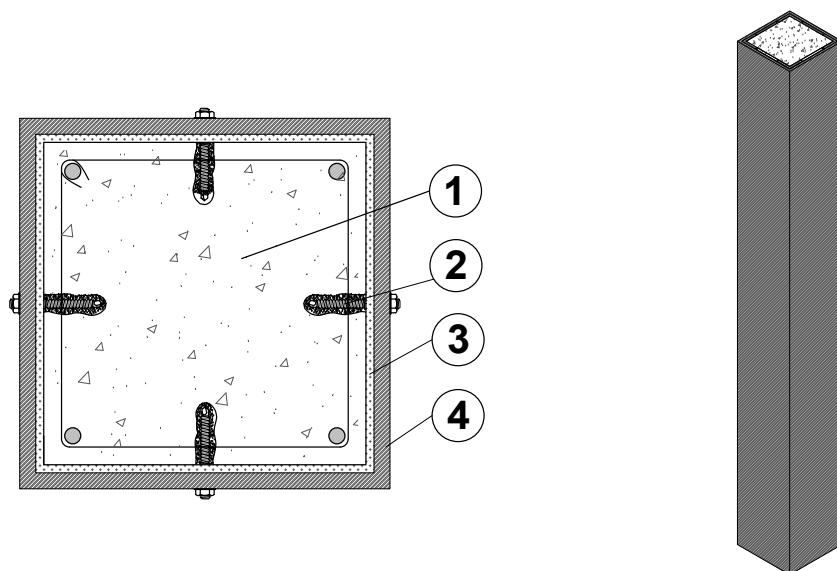
Num pilar submetido à compressão simples, as chapas oferecem reação à deformação transversal do betão, submetendo o elemento a um estado multiaxial, o que conduz a um aumento significativo da tensão resistente de compressão do pilar. Num pilar submetido à flexão composta, a zona comprimida da secção transversal sofre uma expansão, a qual é contrariada pelas chapas metálicas que confinam o elemento (Bento & Rodrigues, 2003)



**Figura 18 - Efeito de confinamento das chapas metálicas num pilar submetido à flexão composta (Sousa, 2008).**



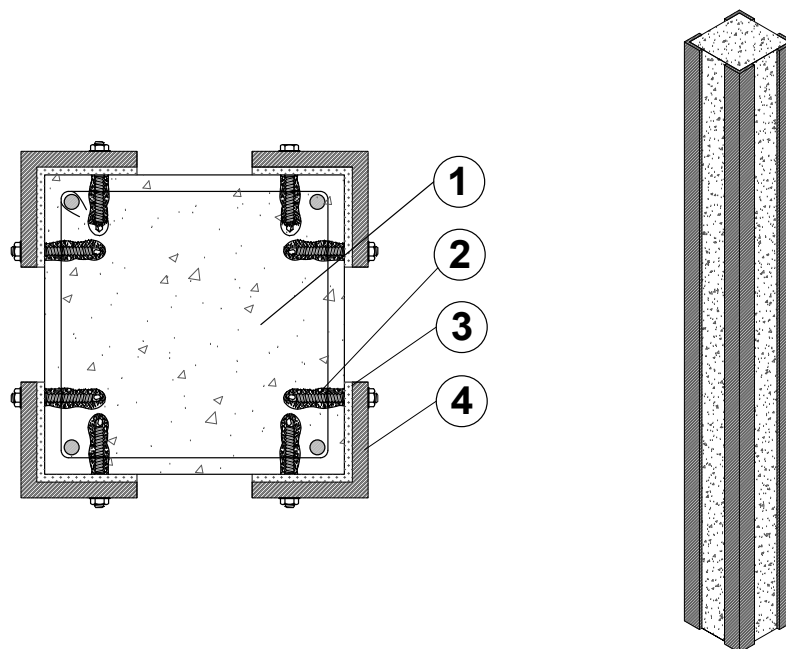
Nas figuras seguintes, demonstra-se a secção de um pilar quadrado encamisado, assim como uma figura em perspetiva de um pilar de betão armado com reforço de encamisamento.



**Figura 19 - À esquerda secção quadrada de um pilar encamisado. À direita o mesmo pilar em perspetiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – chapa metálica.**

Apesar da eficiência deste reforço ser elevada, pode ter inconvenientes associados principalmente devido a possíveis patologias do betão envolvido especialmente se ainda contiver humidades e mais grave, se tiver organismos ou elementos de armaduras oxidadas, que poderão diminuir ainda mais a contribuição do material totalmente confinado. A fluência e a retração são fenómenos complexos que dependem de um conjunto alargado de fatores, sendo os mais significativos a humidade e temperatura ambientes, as dimensões do elemento e a composição do betão. Visto que o encamisamento total do betão altera estas condicionantes, o betão poderá degradar-se mais rapidamente. Estas condições, adicionalmente ao custo do material e do processo construtivo, normalmente implicam que esta solução não seja utilizada.

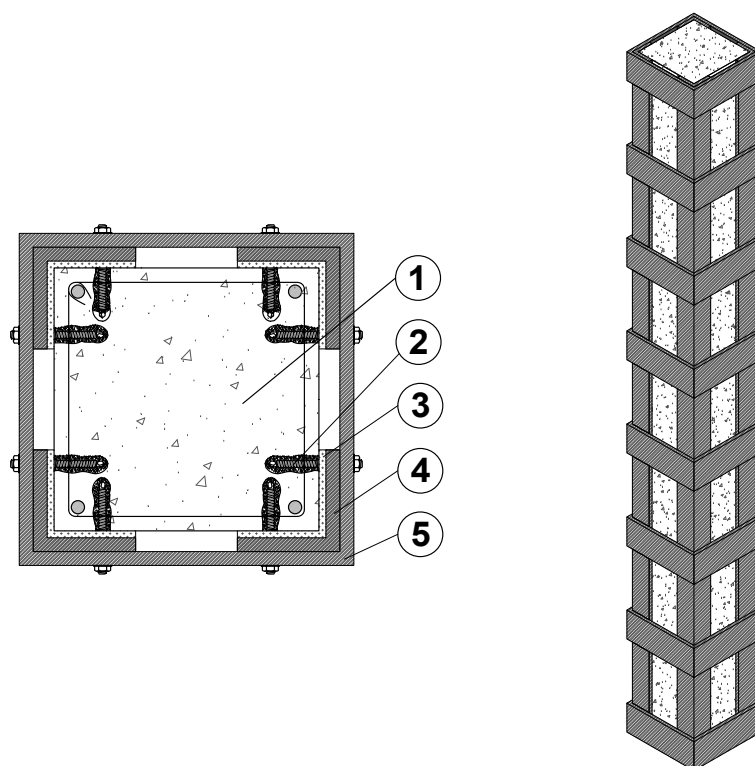
De seguida demonstra-se um tipo de reforço ao esforço axial num pilar através de cantoneiras de aço aplicadas nos cantos das secções a reforçar, que não têm os inconvenientes duma solução de confinamento total.



**Figura 20 - À esquerda está representada uma seção quadrada de um pilar com reforços de cantoneiras de aço. À direita o mesmo pilar em perspectiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – cantoneira de aço.**

Esta solução também tem inconvenientes óbvios especialmente se o pilar estiver sujeito a esforços de compressão, sendo natural que seja necessário o confinamento transversal pois as armaduras transversais existentes na peça de betão armado, por norma até são mais afetadas pelas patologias de oxidação do que as armaduras longitudinais com perdas de aderência, pelo que há necessidade de mobilizar o núcleo de betão pela cintagem de elementos metálicos que liguem os elementos longitudinais de modo a que o núcleo de betão seja mobilizado conjuntamente com os reforços metálicos longitudinais.

Demonstra-se agora a uma solução mais recorrente e aconselhável para reforçar um pilar sujeito principalmente a esforços de compressão:



**Figura 21 – À esquerda está representada uma seção quadrada de um pilar com reforços de cantoneiras de aço com uma cintagem feita através de chapa metálica. À direita o mesmo pilar em perspetiva. Legenda: 1 – betão armado existente; 2 – bucha metálica; 3 – resina epóxi; 4 – cantoneira de aço; 5 – chapa metálica.**

As recomendações são um pouco diferentes das tomadas para as tipologias de reforço a vigas sujeitas à flexão.

Recomendações (Sousa, 2008):

- Espessura resina epóxi – 1 a 2 cm;
- Espessura chapa metálica < 8 a 15mm;

O reforço é realizado com cantoneiras dispostas nos cantos, coladas ao betão com uma resina epóxi. Poderá ser tomado como solução, fixar as cantoneiras à armadura principal por soldadura, ou como representa a figura 20 através de buchas metálicas. A utilização de buchas metálicas é adequada quando as cantoneiras apresentam dimensões consideráveis.

Relativamente às chapas metálicas de cintagem, podem ser fixas também por buchas metálicas, ou soldadas às cantoneiras de reforço.

O cuidado especial a ter nestes elementos de reforço, é que a deformação do pilar na rotura devido a esforços de compressão pode acontecer a meia altura pelo excesso de deformação lateral, pelo que poderá ser necessário aumentar o reforço do tipo indicado ou então modificar a cintagem para elementos oblíquos que devido ao tipo de comportamento treliçado favorece a resistência lateral.

#### 4.3.1.2. Dimensionamento

No dimensionamento à compressão simples, deverá ter-se em consideração o aumento da resistência à compressão do betão por confinamento.

Vários autores têm proposto diferentes modelos que procuram explicar o comportamento do betão confinado e que permitam a estimativa da sua resistência de compressão e extensão máximas. De entre esses modelos, explicita-se o proposto pelo Model Code 90 (CEN, 1993). De acordo com este documento o valor corrigido da resistência à compressão do betão,  $f_{ck,cf}$  quantifica-se a partir de uma das seguintes expressões:

$$f_{ck,cf} = f_{ck} \times \left( 1,0 + 5,0 \times \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \text{ quando } \sigma_2 < 0,05 \times f_{ck} \quad (4.7)$$

$$f_{ck,cf} = f_{ck} \times \left( 1,0 + 5,0 \times \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \text{ quando } \sigma_2 > 0,05 \times f_{ck} \quad (4.8)$$

em que:

$f_{ck,cf}$  é o valor característico corrigido da resistência à compressão do betão;

$f_{ck}$  é o valor característico da tensão de rotura à compressão do betão;

$\sigma_2$  a tensão de confinamento, dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \times \alpha_n \times \alpha_s \times \omega_w \quad (4.9)$$

sendo:

$\omega_w$  a percentagem volumétrica de armadura transversal definida por:

$$\omega_w = \frac{\text{Volume de armadura transversal}}{\text{Volume de betão}} \quad (4.10)$$

$\alpha_n$  o coeficiente redutor para ter em conta a área de betão em planta efetivamente confinada. Os valores deste coeficiente encontram-se definidos no Model Code 90.

$\alpha_s$  o coeficiente redutor para ter em conta a área de betão em altura efetivamente confinada. Os valores deste coeficiente encontram-se definidos no Model Code 90 (CEN, 1993);

Este método é aplicável quer a seções circulares, quer a seções retangulares de pilares confinados por armaduras em forma de cintas ou helicoides passivas sujeitas a um carregamento de compressão axial.

Sendo assim, o cálculo da resistência à compressão do pilar poderá entrar em consideração este valor corrigido da resistência à compressão do betão,  $f_{ck,cf}$  obtido pelas expressões anteriores. O dimensionamento realiza-se a partir da seguinte expressão:

$$N_{sd} \leq N_{rd} = A_c^i \times f_{cd,cf} + A_s^i \times f_{syd}^i + A_s^r \times f_{syd}^r \quad (4.11)$$

Em que:

$N_{sd}$  corresponde ao esforço axial atuante;

$N_{rd}$  corresponde ao esforço axial resistente;

$f_{ck,cf}$  tensão de cálculo resistente de compressão corrigida do betão;

$f_{syd}^i$  tensão de cedência do aço das armaduras iniciais;

$f_{syd}^r$  tensão de cedência do aço das chapas de reforço;

$A_c^i$  área de betão da secção inicial;

$A_s^i$  área de armadura longitudinal da secção inicial;

$A_s^r$  área total das chapas de reforço.

A verificação aos diferentes limites de utilização deverá ser realizada usando a área das chapas transformadas em área de aço em varão por meio do coeficiente de homogeneização ( $\beta = f_{syd}^r / f_{syd}^i$ ).

# *Capítulo 5*

---

*Análise de tipologias de reforço  
em SolidWorks*





## 5. ANÁLISE DE TIPOLOGIAS DE REFORÇO EM SOLIDWORKS

Tendo o objetivo estabelecido em estudar uma otimização dos reforços, optou-se por elaborar uma modelação numérica, que permitisse avaliar as tensões no betão e nas chapas de aço, sujeitas a determinadas ações. Variando o tipo de reforço e mantendo a mesma carga, é possível analisar através das comparações entre as diversas modelações, os valores das tensões obtidos.

O programa usado para esta modelação foi o SolidWorks. Este software foi desenvolvido pela *SolidWorks Corporation*, adquirida em 1997 pela *Dassault Systèmes S.A.* para os sistemas operativos Windows da Microsoft.

O SolidWorks baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície, começa com a definição de topologia em um esboço 2D ou 3D. A topologia define a conectividade e certos relacionamentos geométricos entre vértices e curvas, no esboço e externos ao esboço.

Este software dedica-se a fornecer a engenheiros, projetistas e outros tipos de profissionais as ferramentas necessárias para criar melhores tipos de produto.

A componente que permite obter os resultados pretendidos é o *SolidWorks SimulationXpress*. Este é um software de análise estrutural totalmente integrado no *SolidWorks*. O *SimulationXpress* faz testes de simulação de um componente, permitindo responder a questões acerca da resistência, eficiência e economia.

Através da *static simulation* incorporada na *SimulationXpress*, é possível obter uma relação entre as cargas e as tensões geradas nos diferentes elementos desenhados.

A particularidade principal deste software, relacionada com o âmbito desta dissertação é que permite facilmente moldar diferentes tipos de seções transversais. É fácil variar o tipo de geometria das chapas de reforço, o que se torna uma grande vantagem, pois permite conceber diferentes tipos de reforço, variando quer as espessuras, quer as larguras e alturas das chapas, e até mesmo a zona de colocação destas. Esta facilidade conduz a uma otimização no reforço quando se confronta as diferentes tipologias com as tensões geradas pelas cargas exteriores (DS SolidWorks, 2016).

## **5.1. Considerações iniciais**

Neste estudo, de modo a ter elementos comparativos, irá ser usado como modelo uma viga-tipo. Ir-se-á manter as dimensões da viga para as diferentes tipologias de reforço, assim como as condições de apoio e as ações externas. Escolher-se-á soluções usuais destes elementos de betão armado.

Para efeitos de simplificação na modelação dos reforços no SolidWorks irá ser considerada uma ligação perfeita entre as chapas metálicas e o betão armado. Algo que na prática não acontece, visto que a boa aderência entre os dois materiais é essencial para o funcionamento entre eles. Como dito no capítulo anterior, na ligação pode ser usado resina epóxi e/ou parafusos, entre outros ligantes. Para o efeito deste estudo, onde o objetivo é comparar as geometrias de reforços, para se obter a melhor solução para determinados casos, incluir estes parâmetros de aderência acaba por não ser essencial no estudo, pois os resultados vão ser analisados de forma comparativa.

### **5.1.1. Dados de modelação**

#### **5.1.1.1. Propriedades mecânicas do betão**

Para a definição das propriedades mecânicas do betão, considerou-se o betão como sendo da classe mais baixa (C12/15). Opta-se por esta classe, pois naturalmente o betão que requer intervenções, já não tem as propriedades originais, e visto que não há nenhum ensaio para averiguar o estado das propriedades mecânicas, utiliza-se o betão com padrões de resistência mais baixos na tentativa de ir ao encontro com os valores reais. No entanto, é provável que uma estrutura que esteja num estado em que necessite de reforço, que apresente valores de resistência ainda mais baixos.

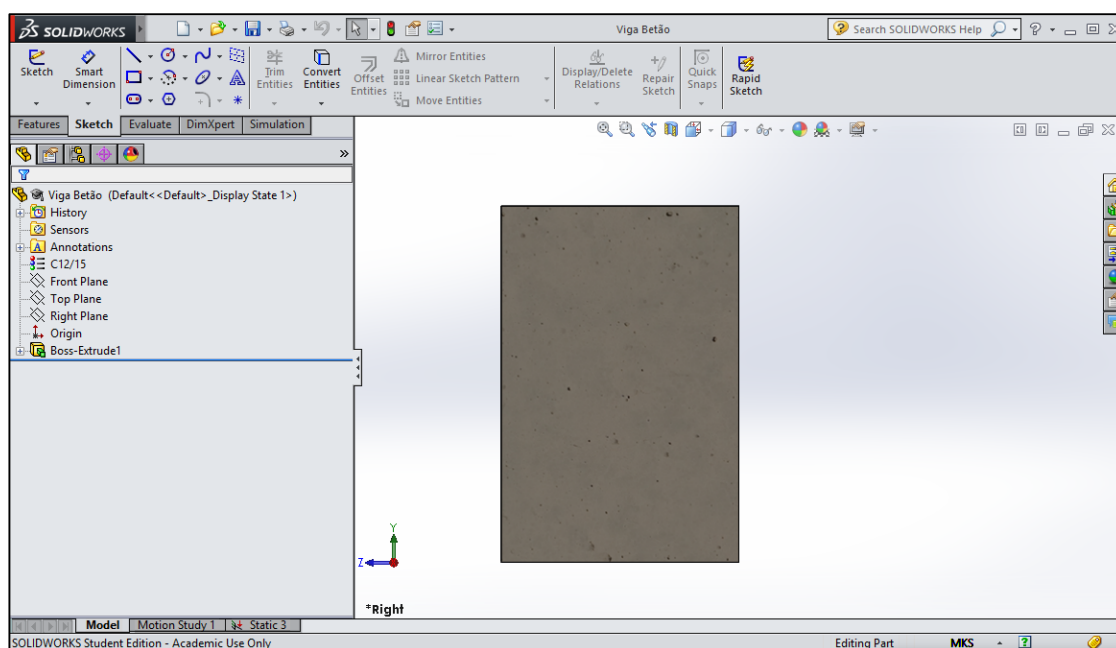
**Tabela 6 - Propriedades mecânicas do betão inseridas no SolidWorks.**

Resistência à compressão	$f_{ck} = 12 \text{ MPa}$
Coeficiente de Poisson	0*
Módulo de elasticidade	27 GPa
Módulo de rigidez	96 GPa
Peso volúmico	2400 Kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	$f_{ctm} = 1,6 \text{ MPa}$

\*O coeficiente de Poisson do betão poderá ser considerado igual a 0,2 para betão não fendilhado e 0 para betão fendilhado (Cachim & Morais, 2013).

No caso do aço, opta-se por usar um aço de maior resistência. O escolhido é o S 355.

O programa tem bastante simplicidade na conceção de desenho, e esse é a principal vantagem da utilização deste software, como dito anteriormente, pois permite obter através de simulações, resultados para uma vasta gama de possibilidades de geometria. Neste caso é bastante benéfico, dada a liberdade obtida na definição da geometria dos reforços, aplicável sempre a uma mesma viga ou pilar. De seguida demonstra-se a interface de produção de desenho, onde inicialmente já se tem os materiais definidos.



**Figura 22 - Interface de desenho do SolidWorks.**

O SolidWorks permite definir uma mesma viga ou pilar para todos os reforços, pois a simulação pode ser feita juntando diferentes partes (*assembly*).

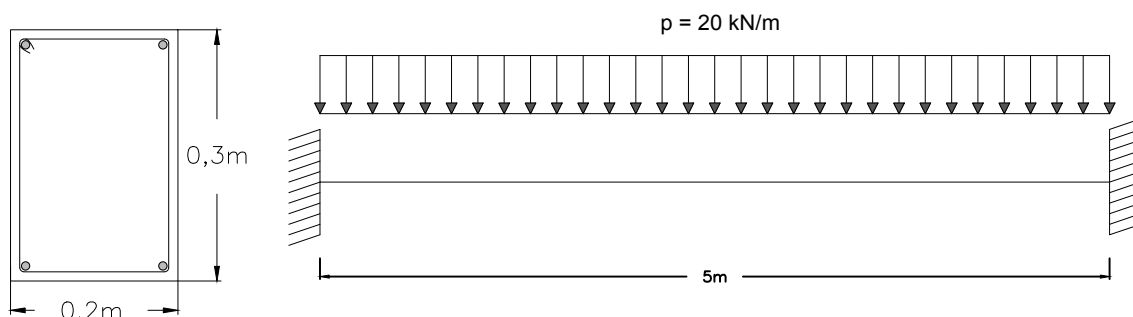
Portanto neste estudo foram executados diferentes reforços, e posteriormente aplicados aos elementos de betão, que foram predefinidos previamente.

Demonstrar-se-á de seguida todas as considerações tomadas antes da aplicação dos reforços, e posteriormente os seus resultados.

## 5.2. Modelação do elemento de betão armado

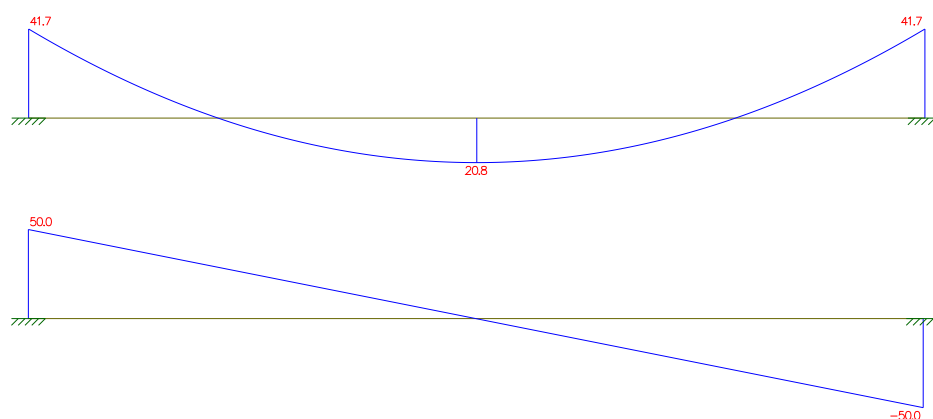
### 5.2.1. Definição da viga-tipo

A solução da viga-tipo escolhida é bi-encastada com 5 m de vão, e seção transversal 0,2x0,3 m, cuja carga exterior é de 20 kN/m (figura 23).



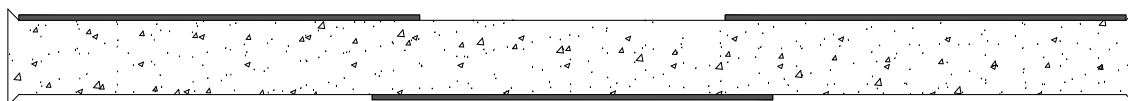
**Figura 23 - Seção transversal e esquema da viga bi-encastada com as cargas exteriores representadas.**

Como foi referido no capítulo 3, as condicionantes das vigas de betão armado costumam ser os esforços de flexão e cortante. No caso do exemplo tomado, a viga terá momentos positivos e negativos, como se pode observar no diagrama de momentos fletores da figura 24.



**Figura 24 - Diagrama do momento fletor da viga-tipo, em cima. Em baixo está representado o diagrama do esforço transverso para a mesma viga-tipo. Valores em kN/m para os momentos fletores, e kN para o esforço transverso.**

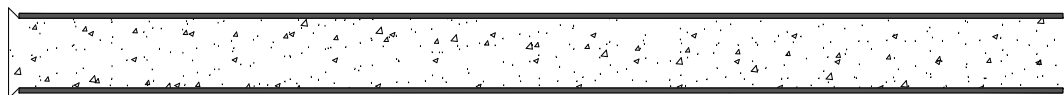
Existem valores máximos nos apoios, e tem-se o momento positivo a meio vão que é igualmente prejudicial, visto que betão quando sujeito a esforços de tração apresenta grandes lacunas. Com este diagrama, pressupõe-se que as zonas de reforço seriam então na zona de apoios na parte superior da viga, e a meio vão na zona inferior, como sugere o esquema da a figura 25.



**Figura 25 – Reforço descontinuo à flexão de uma viga bi-encastada com chapas metálicas nas zonas onde o momento fletor é maior.**

Apesar de esta ser a forma mais correta para reforçar uma viga à flexão, em obra pode não ser aplicado da mesma maneira, pois a aplicação torna-se mais simples se for uniforme. Esta consideração está do lado da segurança, pois acaba por ter mais área de aço. No entanto, em certas situações, a aplicação de reforço contínuo pode originar uma discrepância económica final. Assim, para cada caso, deverá ser efetuada uma análise criteriosa onde é ponderado o custo do volume de material, contrapondo com o custo da sua aplicação, de modo a obter a solução mais vantajosa. Para os efeitos deste estudo, considerar-se-á um reforço contínuo ao longo da viga.

Como a viga-tipo é bi-encastada, tem-se momentos positivos e negativos, portanto as chapas contínuas serão aplicadas na face superior e inferior (figura 26).

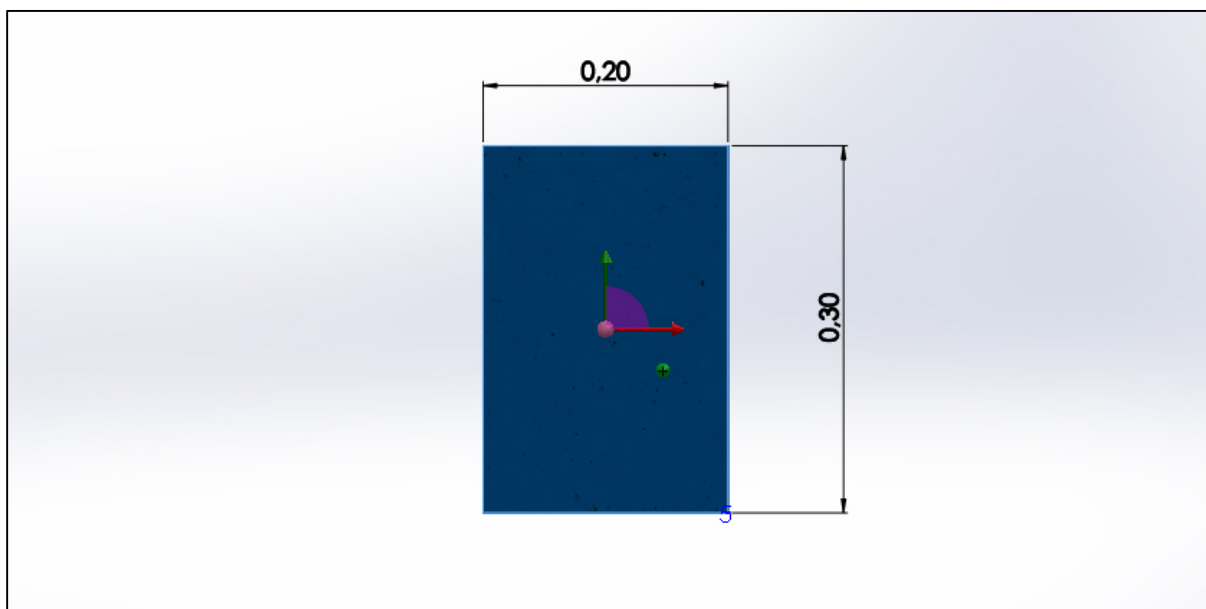


**Figura 26 - Reforço contínuo à flexão de uma viga bi-encastada com chapas metálicas.**

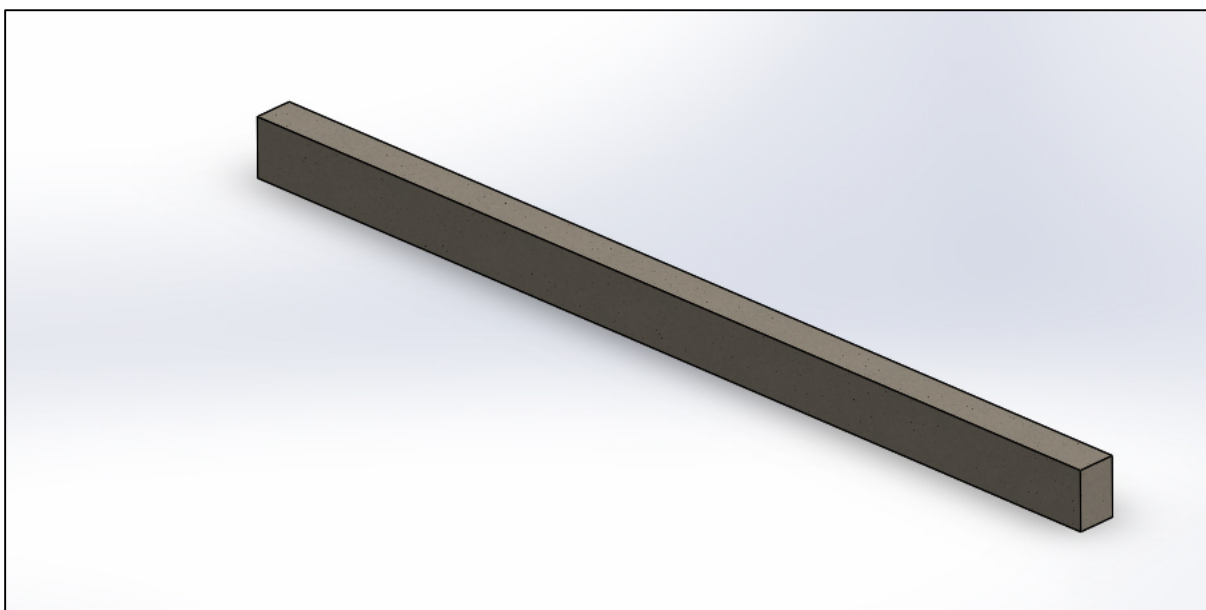
Com esta definição da viga que irá ser o modelo para os reforços, resta enumerar as diferentes tipologias que irão ser testadas.

### 5.2.2. Inserção da viga-tipo no SolidWorks

Após serem definidas as características do betão, expostas anteriormente, foi definida a geometria da secção da viga conforme o subcapítulo anterior, e posteriormente foi projetada em profundidade, dando assim os 5 m de comprimento.

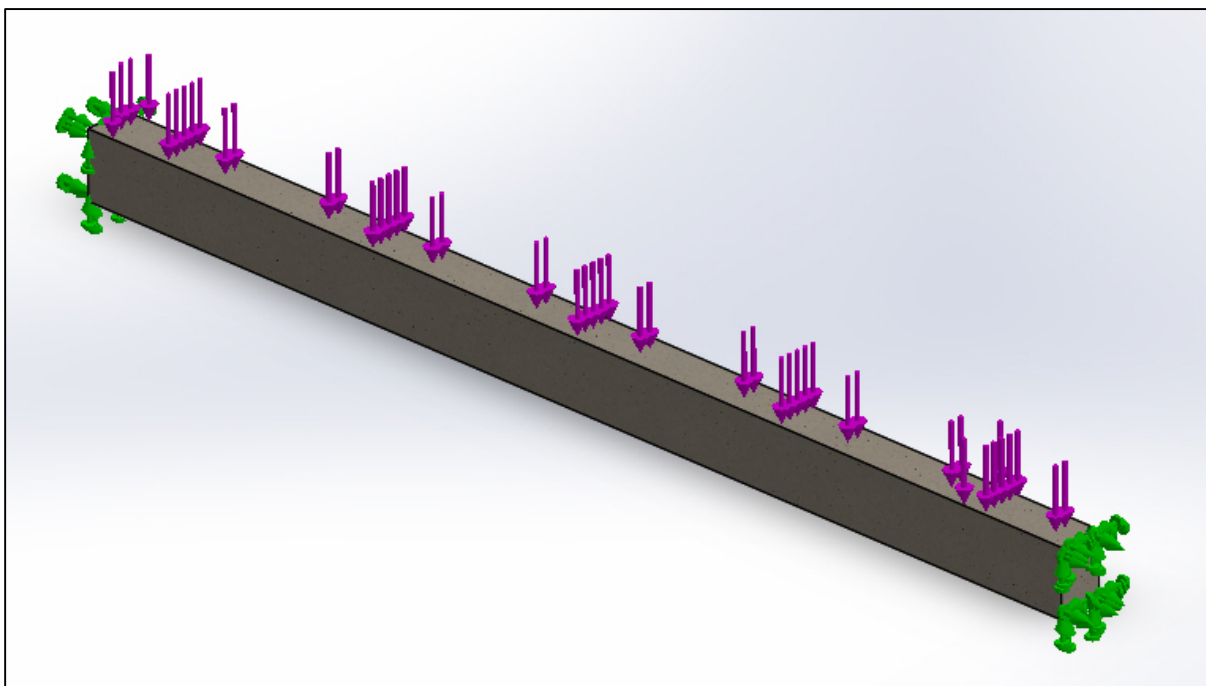


**Figura 27 - Definição da secção da viga-tipo no SolidWorks.**

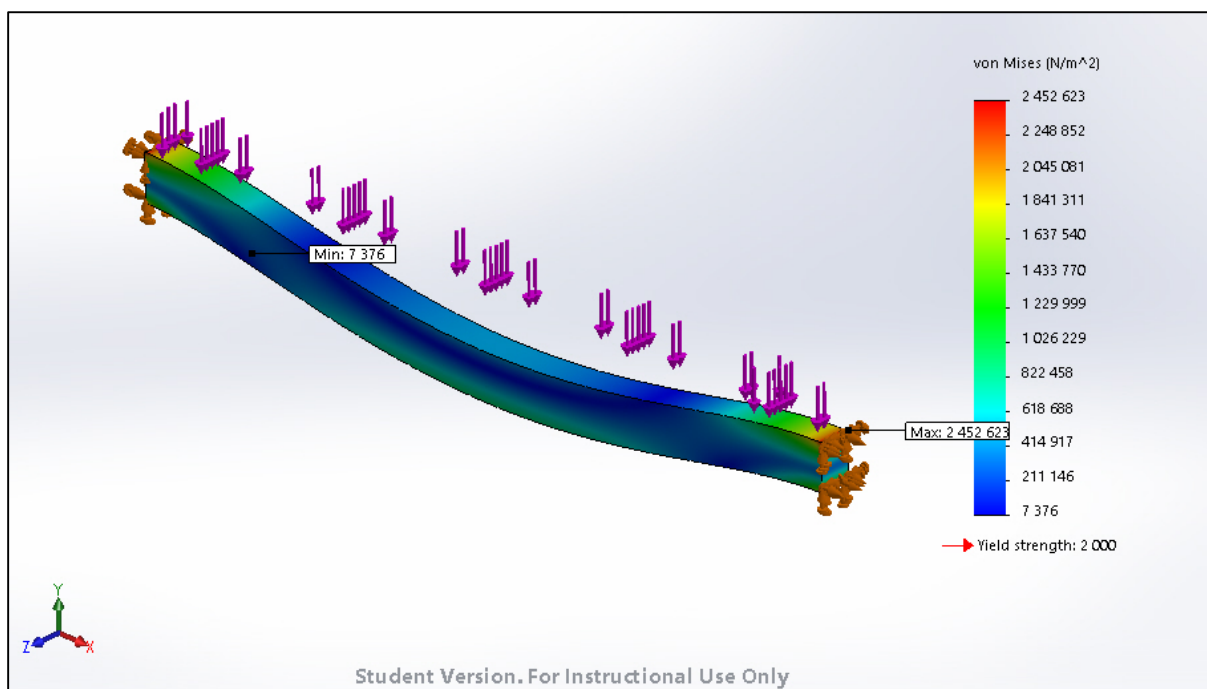


**Figura 28 - Perspetiva da viga-tipo em SolidWorks.**

Após definida toda a geometria da viga, é necessário testá-la sem o uso de qualquer reforço, para obter um valor de comparação relativo aos resultados retirados após se inserir os reforços. Na figura abaixo, pode-se verificar as cargas aplicadas e condições de apoio à qual se sujeita a viga, e na figura 30, tem-se os valores da tensão na viga de betão para as cargas aplicadas.



**Figura 29 - Condições de carga e apoios na viga-tipo no SolidWorks.**



**Figura 30 - Valores da tensão no betão após a simulação da aplicação das cargas na viga-tipo no SolidWorks.**

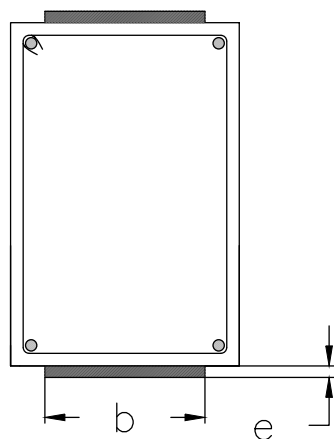
Como se pode averiguar pela figura 30, o valor máximo da tensão no betão é 2,452 MPa. Este será o valor de referência. Quando são aplicadas as chapas metálicas como reforço, pretende-se diminuir este valor.

Procede-se agora à descrição das diferentes tipologias de reforço usadas nesta modelação.

### 5.2.3. Tipologias utilizadas na simulação

Para a modelação em SolidWorks serão escolhidos três tipos diferentes de reforços. O primeiro modelo escolhido é o mais simples, normalmente usado quando é necessária uma intervenção devida aos esforços excessivos de flexão. Além de ser simples, é um modelo muito prático, daí ter surgido a sua escolha:





**Figura 31 - Seção transversal do reforço 1.**

O reforço 1 é semelhante à tipologia 1, que foi anteriormente exposta no capítulo 4, diferindo apenas na medida em que, este apresenta uma solução simétrica, e o descrito no capítulo 4, por ser um exemplo para uma viga simplesmente apoiada, apenas tem a chapa metálica na zona inferior da viga. As recomendações indicam que a espessura da chapa deve ser menor que 4 mm. Para este estudo considera-se a espessura com os valores seguintes:

$$e = \begin{cases} 2mm \\ 3mm \\ 4mm \end{cases} \quad (5.1)$$

A inclusão do valor 4mm, apesar de não recomendado, opta-se por considerar na mesma, pois neste estudo não é tido em conta a espessura de resina epóxi. Assim a simulação fornece mais valores, que consequentemente permite obter mais conclusões comparativas. Considera-se ainda 2 mm o valor adequado mínimo para a espessura de uma chapa metálica.

Para uniformizar, nos restantes reforços também se considera esta gama de valores para as espessuras das chapas de reforço, variando assim as restantes geometrias.

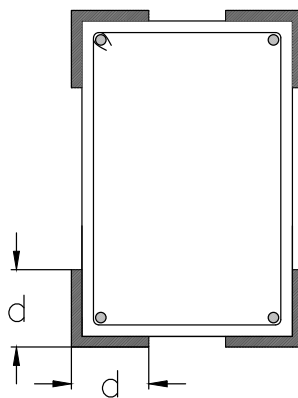
Ainda referente ao reforço 1, quanto à largura da chapa, as recomendações exibidas no capítulo 4, informam que tem de ser superior a 50 mm. Para o estudo, usar-se-á como mínimo o valor de 80 mm, com intervalo de 20 mm até aos 180mm, tendo em conta que, a largura total da seção transversal é 200 mm, sobram cerca de 20mm

(10mm para cada lado) para não ocorrer fissuração, tal como exemplifica a tipologia 2, descrita no capítulo 4.

$$b = \begin{cases} 80mm \\ 100mm \\ 120mm \\ 140mm \\ 160mm \\ 180mm \end{cases} \quad (5.2)$$

Usando todas as espessuras para as diferentes larguras, obtém-se um total de 18 diferentes geometrias para o mesmo tipo de reforço, o que permite obter uma maior diversidade de resultados, pois a área usada na secção transversal sofre uma maior variação.

Para o reforço 2, escolheu-se uma solução com perfis metálicos, como a tipologia 4 do capítulo 4 sugere: uso de cantoneiras. Este tipo de reforço serve não só para reforçar a resistência aos esforços de flexão, mas também transverso, visto ter uma geometria que permite incluir área de aço nas partes laterais da viga:



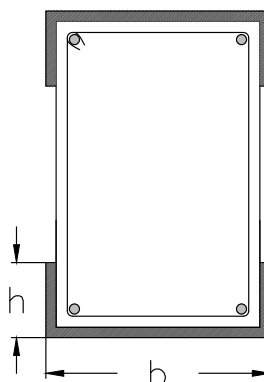
**Figura 32 – Secção transversal do reforço 2.**

Nesta tipologia, usar-se-á a mesma gama de valores de espessuras (equação 5.2) do reforço 1, pelas mesmas razões apresentadas.

Quanto à distância “d” representada nas cantoneiras da figura 32, opta-se, mais uma vez em conformidade com recomendações, pelo seguinte intervalo de valores:

$$d = \begin{cases} 40mm \\ 50mm \\ 60mm \\ 70mm \\ 80mm \\ 90mm \end{cases} \quad (5.3)$$

De modo a abranger uma diferente tipologia, utiliza-se a seguinte seção transversal para o reforço 3:



**Figura 33 - Seção transversal do reforço 3.**

Este reforço, contempla semelhanças com a tipologia 5 do capítulo 4. Diferindo na não representação dos ligantes, e de ser simétrico, por ter condições de apoio diferentes. A geometria tem apenas como variante a altura das chapas laterais “h”, visto que a largura b, corresponde à largura da seção de betão da viga-tipo (0,2 m). A variação de valores tomada é a seguinte:

$$h = \begin{cases} 90mm \\ 100mm \\ 110mm \end{cases} \quad (5.4)$$

Tendo em conta que, 110mm é inferior a metade da altura da viga-tipo.

#### 5.2.4. Valores limites para o betão armado e chapas de reforço

Como visto anteriormente, o valor da tensão máxima no betão armado era de 2,453MPa. Neste caso concreto, visto que o valor definido para a resistência do betão nas zonas de tração, correspondente à zona junta aos apoios e a meio vão da viga, é

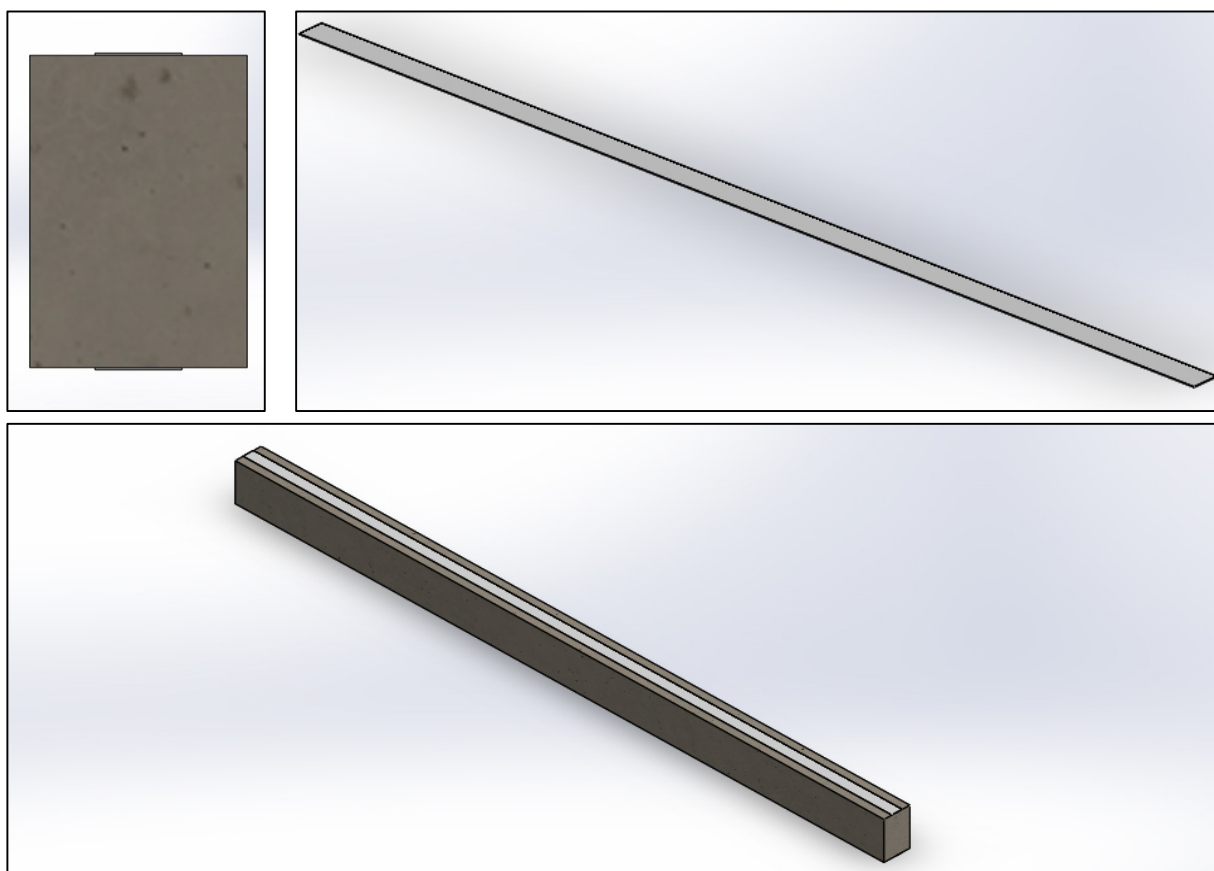
1,6 MPa para o betão da classe C12/15 (Eurocódigo 2), não se verifica a segurança deste elemento.

O aço escolhido, como foi dito anteriormente, é o S355. Habitualmente este aço é pouco usado na construção (os mais utilizados são o S235 e o S275), mas visto que se trata de uma ação de reforço, e é conveniente que o incremento de resistência seja considerável, assume-se este tipo de aço. Como tal, tem-se uma resistência característica,  $f_y$ , de 355 MPa (Eurocódigo 3).

Definidos todos os parâmetros, estão estabelecidas as condições de se proceder à análise de tensões na viga após o reforço.

### 5.2.5. Análise do reforço 1

Como definido no subcapítulo anterior, a tipologia do reforço 1, é a seguinte:



**Figura 34 - Definição do reforço 1 em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.**

Após esta definição, resta apenas definir as cargas e condições de apoio, e fazer a simulação deste reforço.

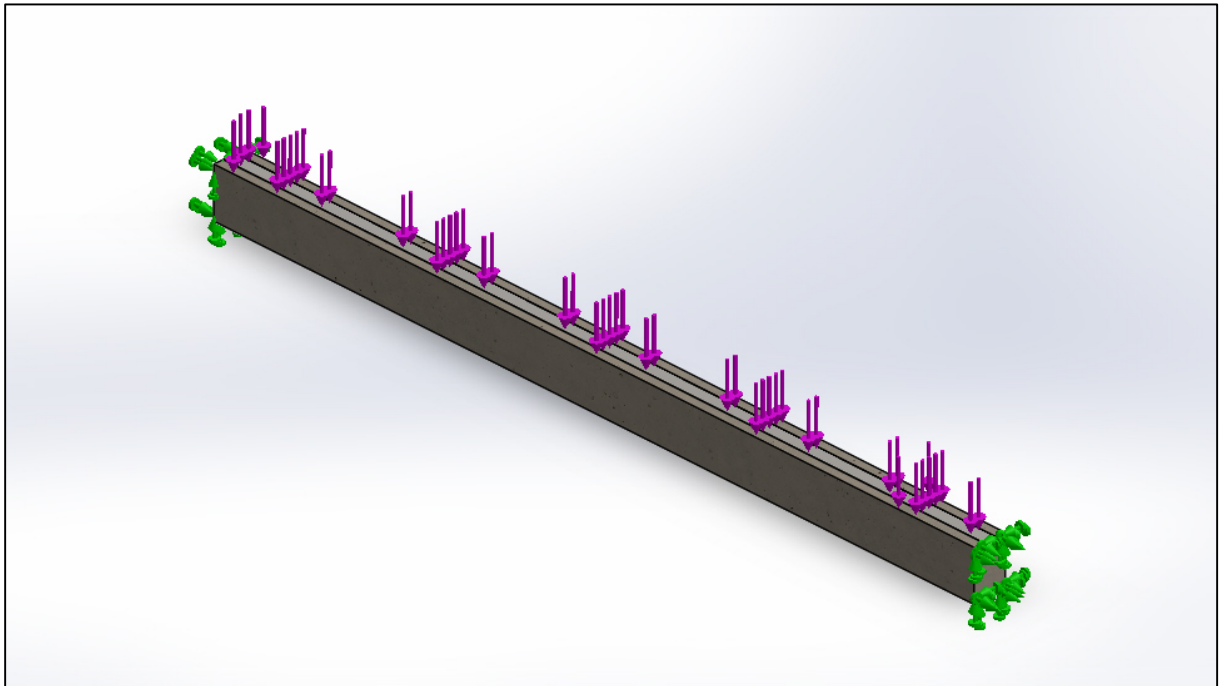


Figura 35 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 1.

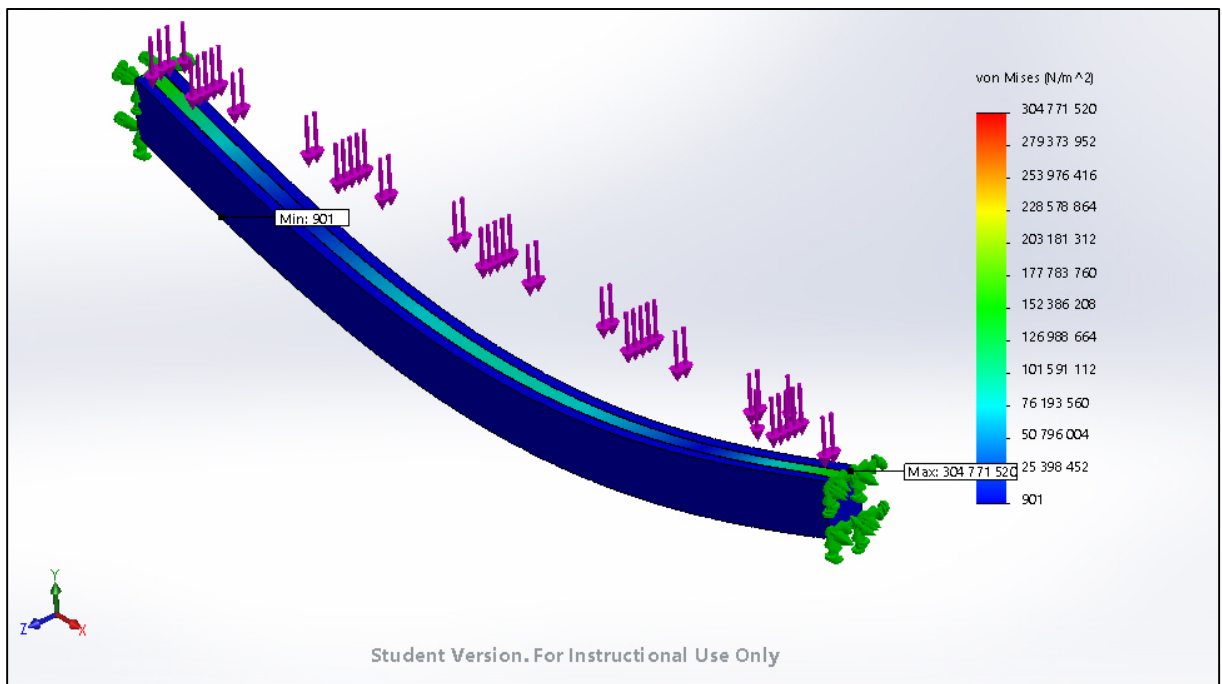
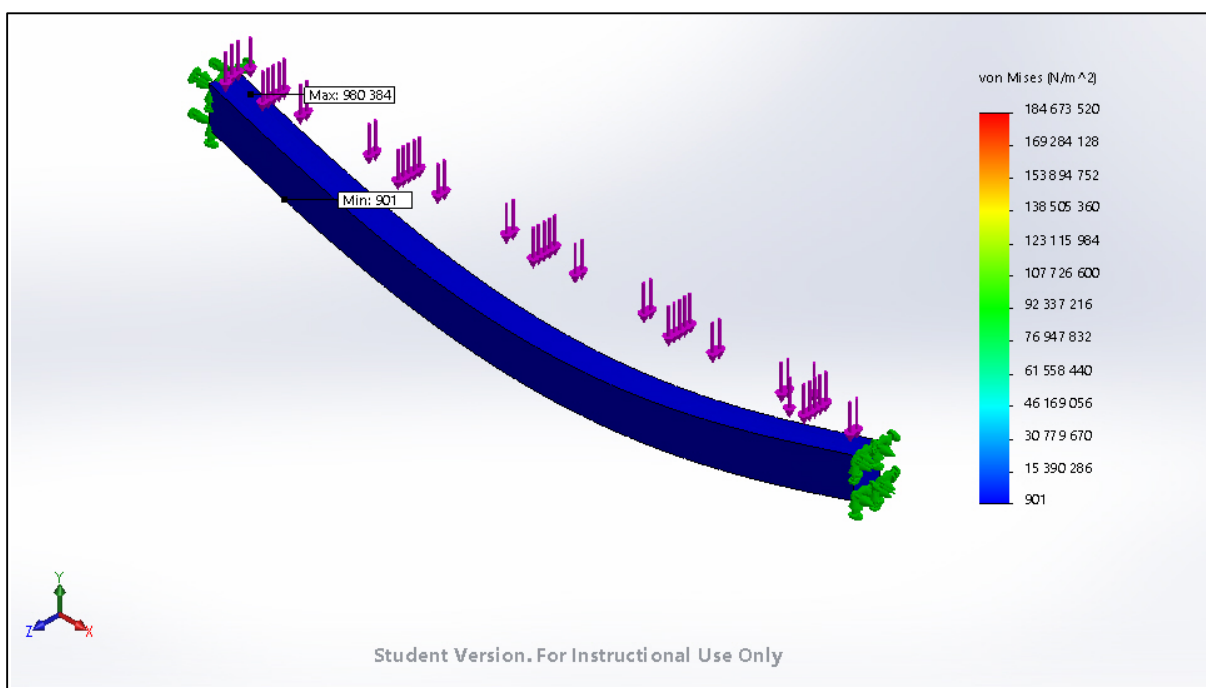


Figura 36 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 1.



**Figura 37 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 1.**

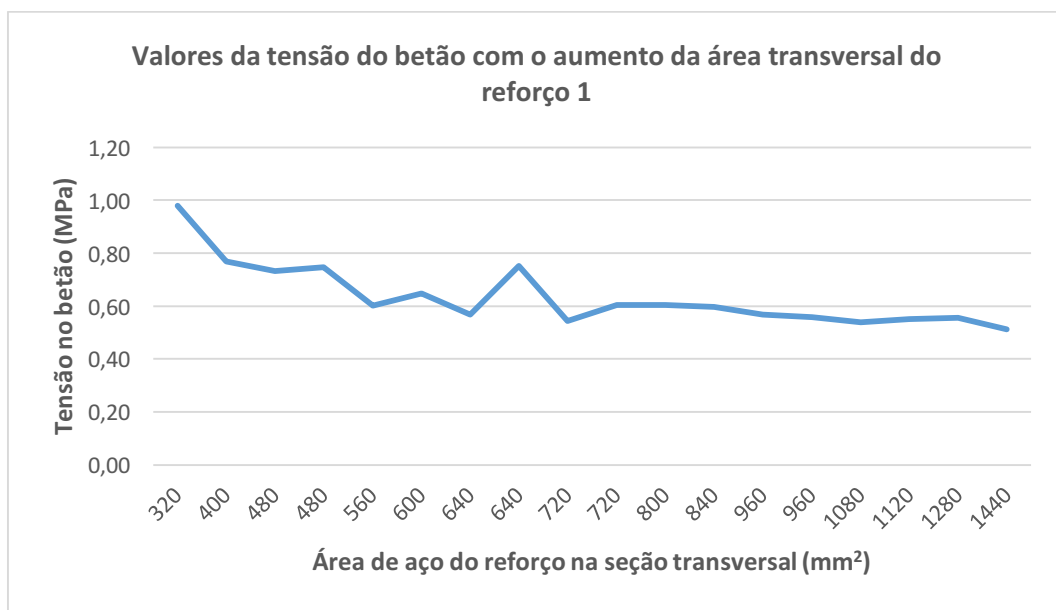
O passo que se segue, é a simulação de todas as combinações entre espessuras e larguras definidas no subcapítulo anterior para esta tipologia de reforço. Nas figuras anteriores, demonstrou-se como exemplo a modelação para o reforço 1 com espessura de 2 mm e largura de 80 mm.

Como é possível verificar, o software permite obter valores de tensão quer para o betão quer para o aço. Isto acontece porque, como dito anteriormente, os elementos de aço e a viga de betão são definidos separadamente, e posteriormente são unidos, e apenas posteriormente se realiza a simulação com as cargas aplicadas, o programa através da criação de malhas, define valores de tensão nos diferentes materiais.

Demonstra-se agora, na seguinte tabela, os valores retirados de todas as simulações do reforço 1, e de seguida confronta-se esses mesmos valores em gráficos de modo a executar uma melhor análise dos mesmos.

Tabela 7 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 1.

	Tensão máxima no aço (MPa)	Tensão máxima no betão (MPa)	Área de aço na seção transversal (mm <sup>2</sup> )
reforço 1 (e = 2mm; b = 80mm)	304,772	0,9804	320
reforço 1 (e = 2mm; b = 100mm)	293,936	0,7700	400
reforço 1 (e = 2mm; b = 120mm)	258,042	0,7329	480
reforço 1 (e = 2mm; b = 140mm)	220,507	0,6009	560
reforço 1 (e = 2mm; b = 160mm)	191,251	0,5681	640
reforço 1 (e = 2mm; b = 180mm)	176,466	0,5435	720
reforço 1 (e = 3mm; b = 80mm)	315,523	0,7463	480
reforço 1 (e = 3mm; b = 100mm)	233,138	0,6487	600
reforço 1 (e = 3mm; b = 120mm)	215,882	0,6041	720
reforço 1 (e = 3mm; b = 140mm)	186,021	0,5980	840
reforço 1 (e = 3mm; b = 160mm)	154,436	0,5671	960
reforço 1 (e = 3mm; b = 180mm)	148,756	0,5384	1080
reforço 1 (e = 4mm; b = 80mm)	262,146	0,7515	640
reforço 1 (e = 4mm; b = 100mm)	198,554	0,6038	800
reforço 1 (e = 4mm; b = 120mm)	175,096	0,5578	960
reforço 1 (e = 4mm; b = 140mm)	155,908	0,5522	1120
reforço 1 (e = 4mm; b = 160mm)	135,692	0,5552	1280
reforço 1 (e = 4mm; b = 180mm)	122,313	0,5133	1440



**Figura 38 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.**

Como se pode averiguar, o decréscimo da tensão do betão não é linear com o aumento da área. Isto deve-se ao facto de a espessura ter influência direta na inércia da seção. Mesmo que a área seja superior, o facto de um reforço ter pouca espessura, pode não ser tão eficaz quanto um reforço que tenha menos área, mas que tenha mais espessura. No gráfico da figura 38, constata-se isso mesmo, pois tem-se a mesma área (480, 640 e 720) repetidamente, e os valores da tensão no betão diferem. O que também é visível na tabela 7. Pode-se concluir que o momento de inércia causado na secção é mais importante na diminuição da tensão.

$$\sigma = \frac{M}{I} z \quad (5.5)$$

Sendo:

$\sigma$  a tensão

M o Momento fletor atuante;

I o momento de inércia;

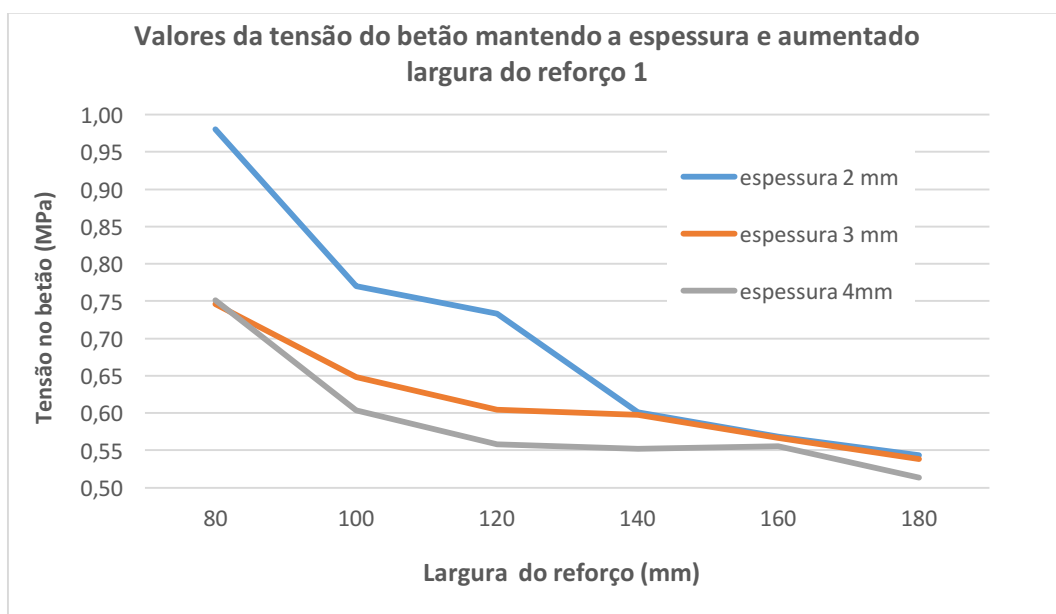
z distância ao centro de gravidade.

Verifica-se que quanto maior for a inércia obtida pelo reforço, menor será a tensão no betão. É de notar que o aumento do valor da inércia tem mais importância



relativamente ao aumento da área, que por sua vez também é proporcional à diminuição da tensão instalada.

Pode-se ainda analisar a redução da tensão com a área de aço para as diferentes espessuras, como está exposto no seguinte gráfico:



**Figura 39 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 1.**

Analisa-se deste gráfico da figura 39, que para a espessura de 2 mm existe uma maior redução quando aumentada a largura da chapa metálica. Isto deve-se ao facto de existir um limite para o qual se torna mais árduo a redução da tensão do betão com o aumento da área de aço.

Pelos resultados expostos, verifica-se que a tensão do aço não ultrapassa o limite da sua resistência, o valor máximo é 304,772 MPa, e o limite com o tipo de aço definido é 355 MPa. Quanto à análise da tensão do betão, depende sempre do dimensionamento pretendido. A intervenção pode ter como objetivo diminuir o valor da tensão no betão para 0,5 MPa por exemplo, ou para os efeitos pretendidos da intervenção, 0,9 MPa pode ser suficiente. Daí surge a necessidade de comparar a eficiência dos reforços, utilizando a área de aço (na seção transversal), com a redução da tensão no betão, em percentagem tendo como valor de referência 2,487 MPa, valor

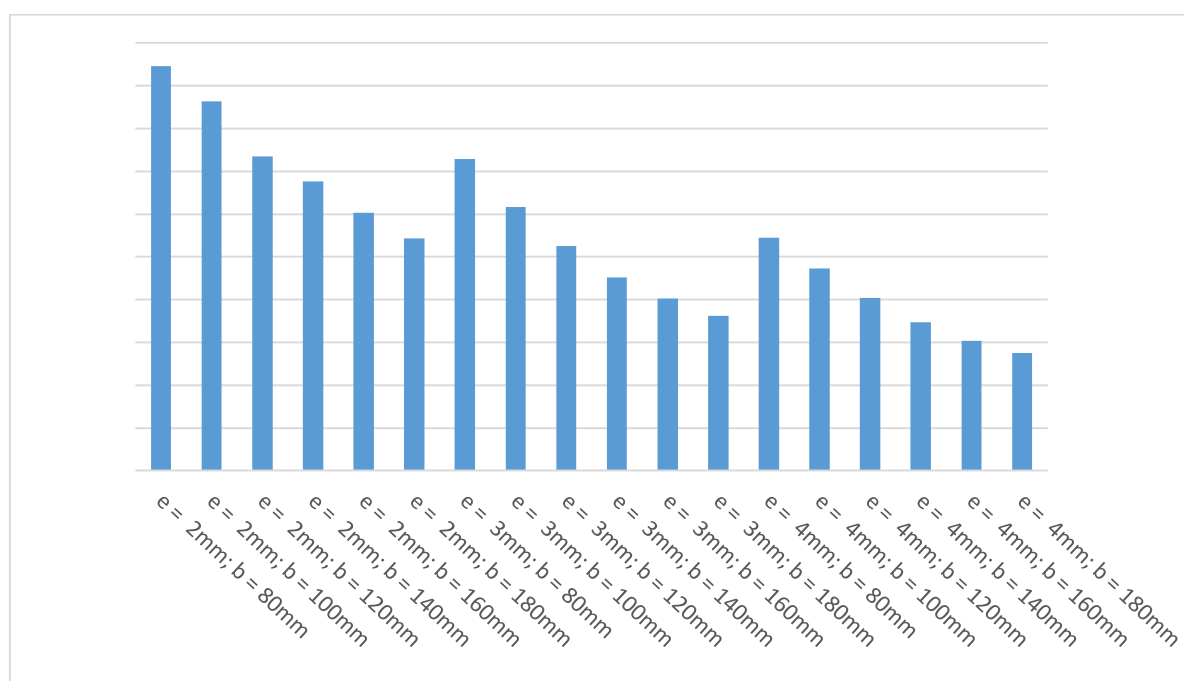
máximo da tensão no betão para a viga-tipo, sem qualquer reforço. O valor desejado depende sempre dos ensaios *in situ* e/ou em laboratório. Apenas após ser feita a inspeção é possível definir o valor mais apropriado para a tensão instalada no betão armado através dos reforços.

**Tabela 8 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 1.**

	<b>Eficiência da redução da tensão do betão (%)</b>	<b>Rácio (eficiência/área de aço)</b>
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 80mm)</b>	61%	0,189
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 100mm)</b>	69%	0,173
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 120mm)</b>	71%	0,147
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 140mm)</b>	76%	0,135
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 160mm)</b>	77%	0,121
<b>reforço 1 (e = 2mm; b = 180mm)</b>	78%	0,109
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 80mm)</b>	70%	0,146
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 100mm)</b>	74%	0,123
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 120mm)</b>	76%	0,105
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 140mm)</b>	76%	0,090
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 160mm)</b>	77%	0,080
<b>reforço 1 (e = 3mm; b = 180mm)</b>	78%	0,073
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 80mm)</b>	70%	0,109
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 100mm)</b>	76%	0,095
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 120mm)</b>	78%	0,081
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 140mm)</b>	78%	0,069
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 160mm)</b>	78%	0,061
<b>reforço 1 (e = 4mm; b = 180mm)</b>	79%	0,055

A seguinte anterior representa a relação da tensão dos valores retirados da modelação do reforço 1 com o valor de referência sem nenhum reforço. Tem-se uma coluna com a percentagem da eficiência da diminuição da tensão do betão retirado dessa comparação, e noutra o rácio entre a quantidade de área de aço usada na secção transversal em que o maior valor será o mais eficiente.

Os mesmos resultados podem ser analisados de modo mais alusivo no seguinte gráfico de barras:



**Figura 40 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na secção transversal usada no reforço 1.**

Como dito anteriormente, é normal que os reforços cuja geometria tem menos gasto de aço apresentem mais eficiência, no entanto, depende sempre para que tensão do betão desejável. Por exemplo, neste reforço 1, caso a intervenção tivesse como objetivo baixar a tensão para valores inferiores a 0.9 MPa (valor novamente usado como exemplo), a solução de 2 mm com a largura da chapa a 80 mm não seria possível, apesar de ser a solução com mais eficiência.

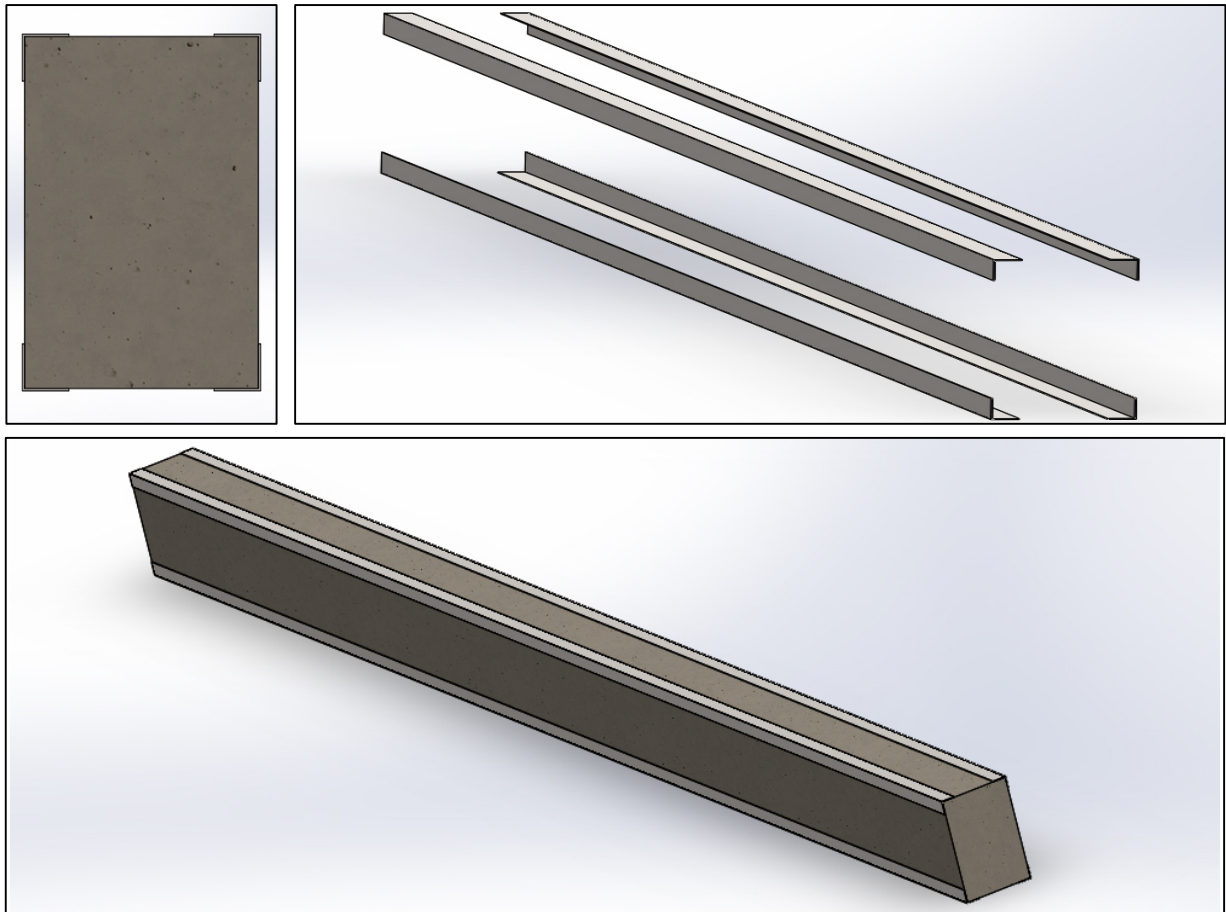
Pode-se averiguar que, como também já foi dito anteriormente, a espessura tem mais eficácia do que a largura da chapa. No gráfico da figura 20 observa-se uma grande diferença no tamanho da barra quando muda de espessura. A primeira tipologia para

as espessuras 3 mm e 4 mm, que corresponde a uma largura de chapa de 80 mm, tem sempre mais eficiência do que o exemplo anterior que usa a espessura mais pequena e com a chapa a 180 mm. E como se pode confirmar na tabela 9, a área usada é pouco menos do dobro entre os casos:

**Tabela 9 - Comparação da influência da espessura na eficiência da redução da tensão no betão em casos específicos.**

	Tensão máxima no aço (MPa)	Tensão máxima no betão (MPa)	Área de aço na seção transversal (mm <sup>2</sup> )
reforço 1 (e = 2mm; b = 180mm)	176,466	0,5435	720
reforço 1 (e = 3mm; b = 80mm)	315,523	0,7463	480
reforço 1 (e = 3mm; b = 180mm)	148,756	0,5384	1080
reforço 1 (e = 4mm; b = 80mm)	262,146	0,7515	640

### 5.2.6. Análise do reforço 2



**Figura 41 - Definição do reforço 2 em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.**

Nesta modelação foi efetuada uma fração em que se incluiu as 4 cantoneiras de aço, para ser mais simples a posterior junção com a viga-tipo de betão, invés de se inserir uma cantoneira de cada vez. Assim o *assembly* conta apenas com duas frações, o que facilita mesmo no desenrolar da simulação.

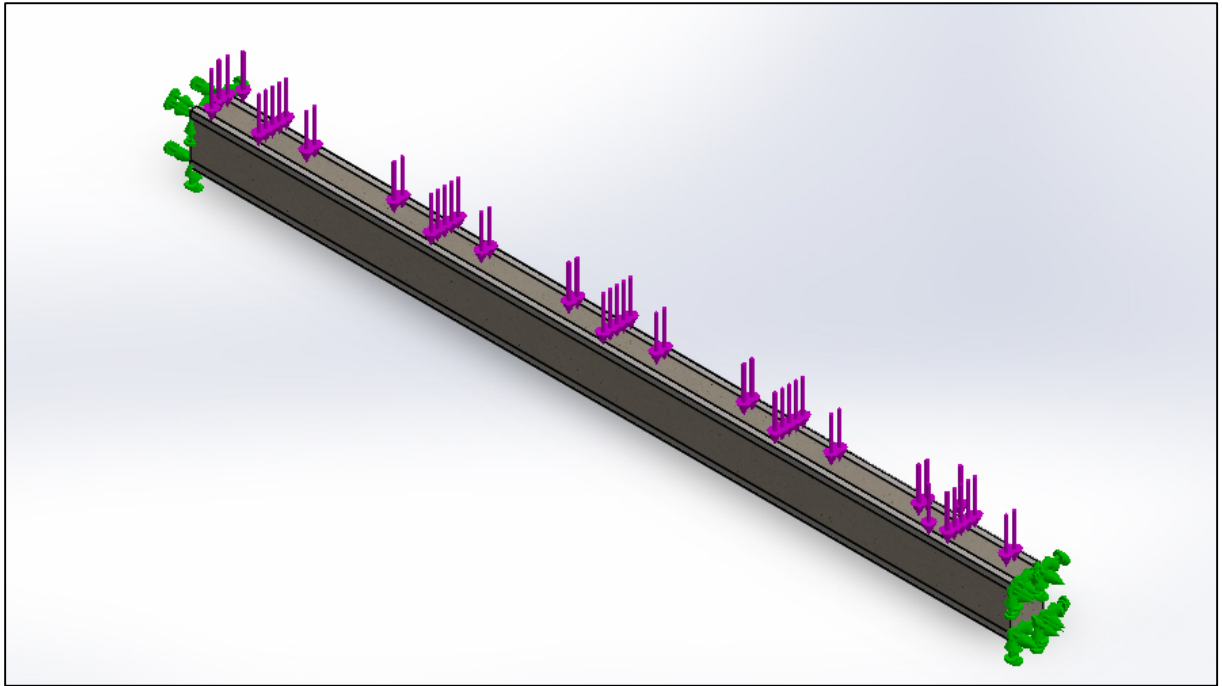


Figura 42 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 2.

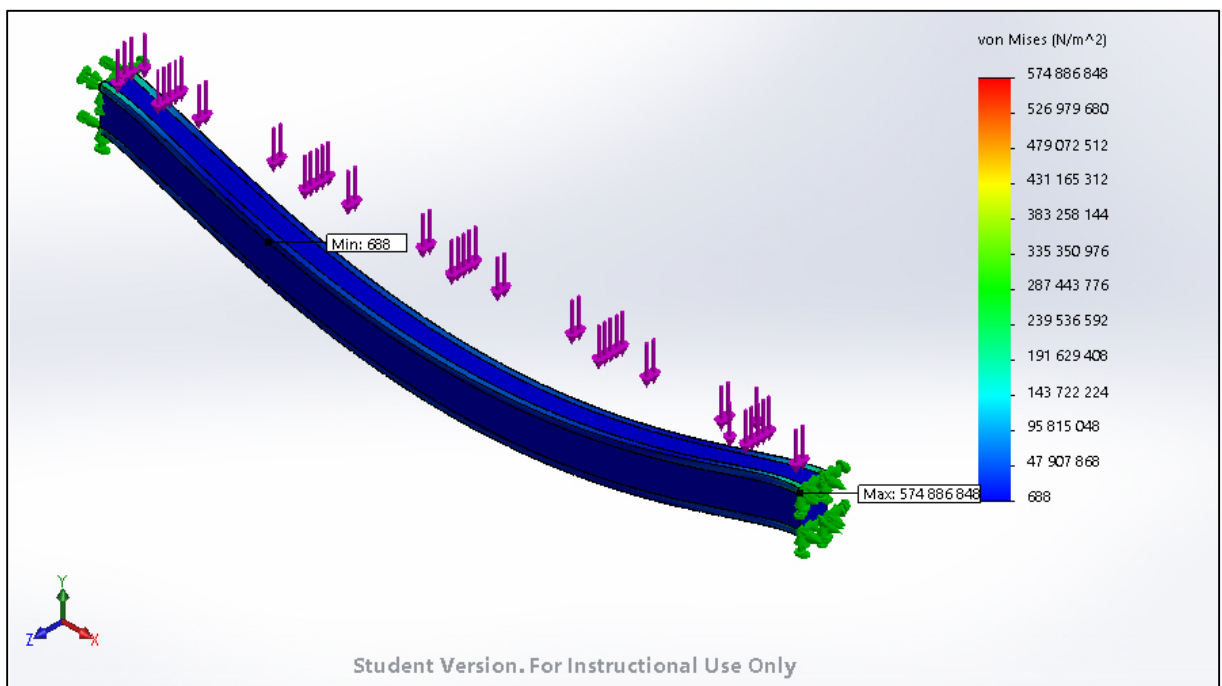
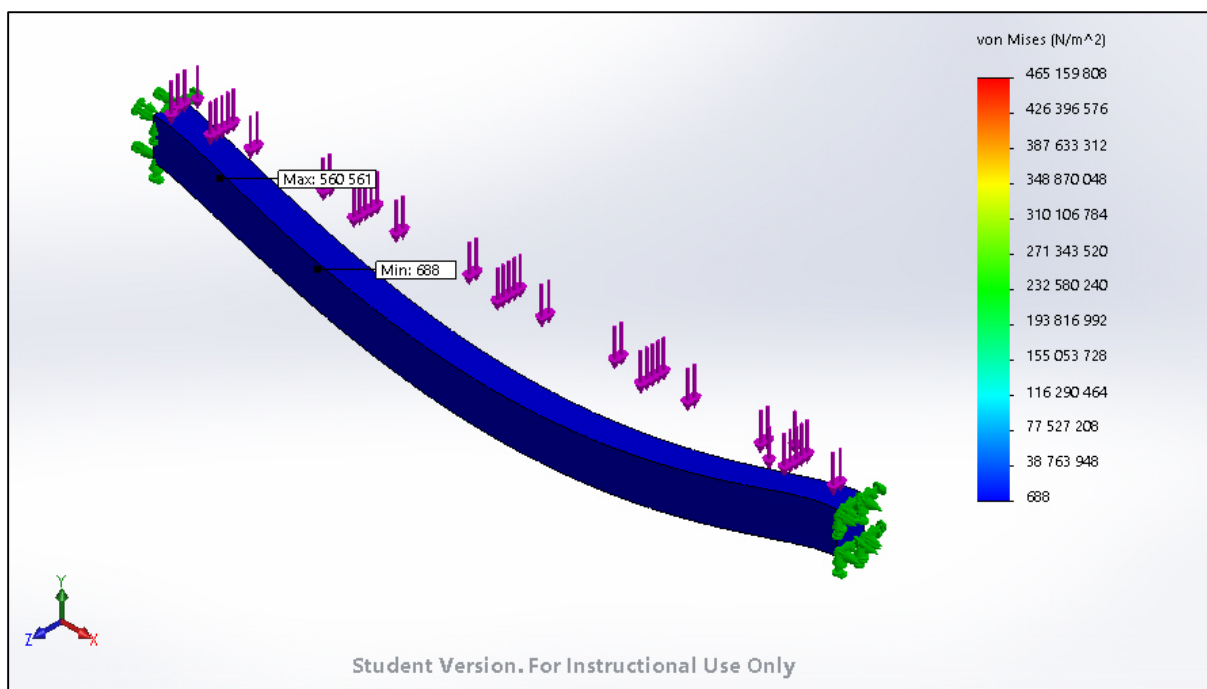


Figura 43 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 2.



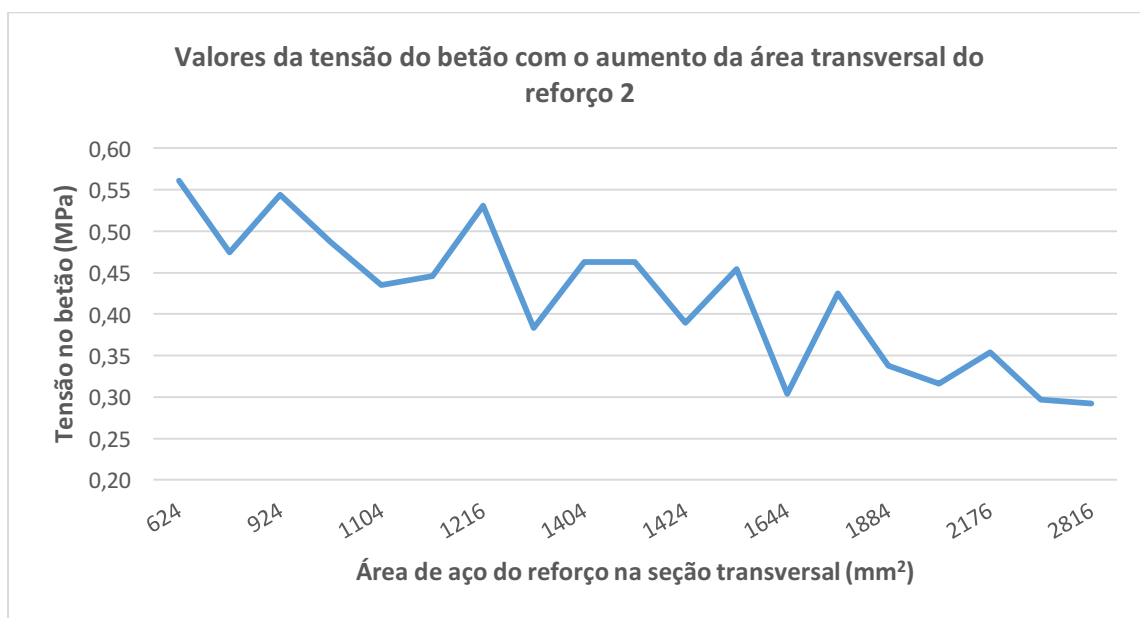
**Figura 44 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 2.**

**Tabela 10 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 2.**

	Tensão máxima no aço (MPa)	Tensão máxima no betão (MPa)	Área de aço na seção transversal (mm <sup>2</sup> )
reforço 2 (e = 2mm; d = 40mm)	574,887	0,5606	624
reforço 2 (e = 2mm; d = 50mm)	523,321	0,4748	784
reforço 2 (e = 2mm; d = 60mm)	497,090	0,4869	944
reforço 2 (e = 2mm; d = 70mm)	399,614	0,4349	1104
reforço 2 (e = 2mm; d = 80mm)	399,318	0,3836	1264
reforço 2 (e = 2mm; d = 90mm)	385,903	0,3897	1424
reforço 2 (e = 3mm; d = 40mm)	611,789	0,5436	924

## Estudo de Reforços de Elementos de Betão Armado com Chapas Metálicas

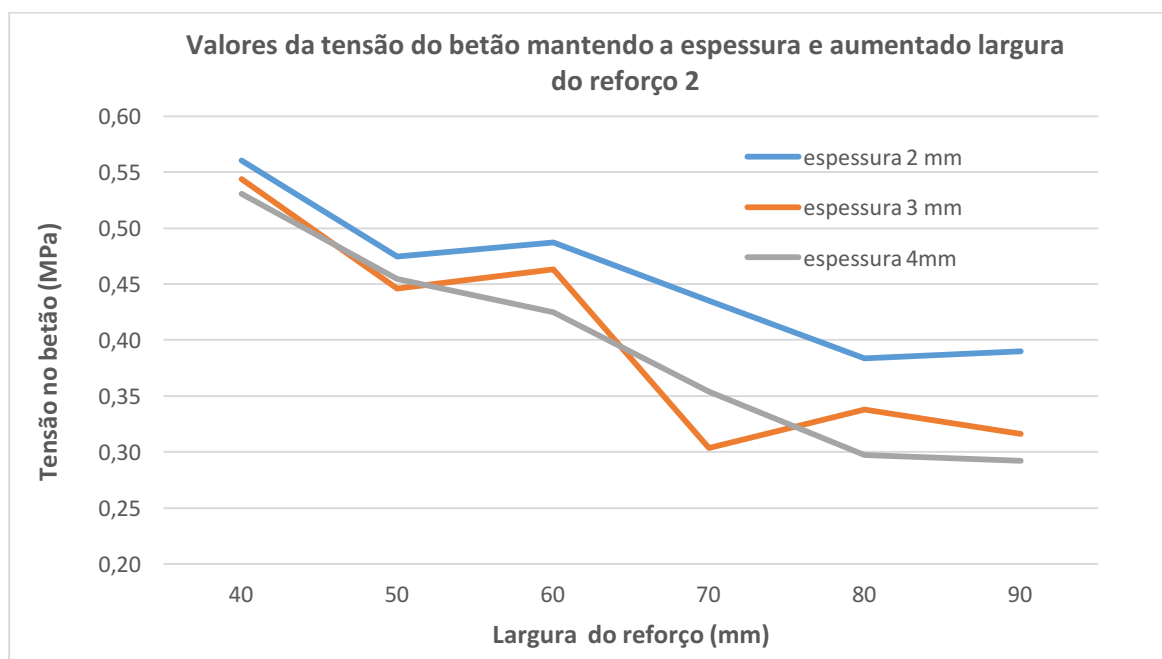
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 50mm)</b>	569,763	0,4458	1164
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 60mm)</b>	507,191	0,4630	1404
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 70mm)</b>	337,360	0,3037	1644
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 80mm)</b>	405,281	0,3381	1884
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 90mm)</b>	382,354	0,3162	2124
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 40mm)</b>	671,142	0,5309	1216
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 50mm)</b>	590,522	0,4547	1536
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 60mm)</b>	522,412	0,4249	1856
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 70mm)</b>	334,498	0,3537	2176
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 80mm)</b>	409,438	0,2972	2496
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 90mm)</b>	379,935	0,2919	2816



**Figura 45 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.**



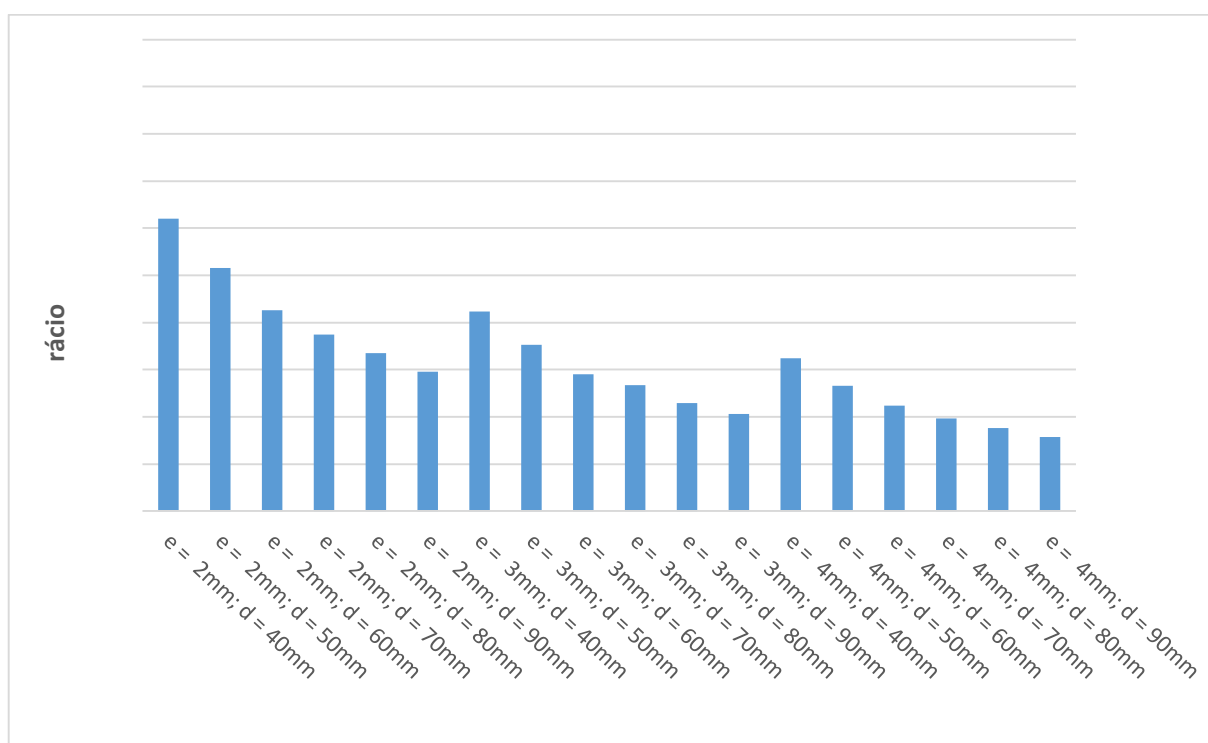
Nestes resultados constata-se que o aumento de resistência não é proporcional com o aumento de espessura e altura das cantoneiras de reforço. Isto deve-se a que a distribuição de tensões entre os materiais resistentes depende das transmissões de esforços de ligação entre ambos e também da distribuição interna de tensões resultantes do equilíbrio de esforços internos com os esforços transmitidos pelas ações externas, relações que não são diretamente proporcionais.



**Figura 46 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 2.**

**Tabela 11 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 2.**

	<b>Eficiência da redução da tensão do betão (%)</b>	<b>Rácio (eficiência/área de aço)</b>
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 40mm)</b>	77%	0,124
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 50mm)</b>	81%	0,103
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 60mm)</b>	80%	0,085
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 70mm)</b>	83%	0,075
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 80mm)</b>	85%	0,067
<b>reforço 2 (e = 2mm; d = 90mm)</b>	84%	0,059
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 40mm)</b>	78%	0,085
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 50mm)</b>	82%	0,071
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 60mm)</b>	81%	0,058
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 70mm)</b>	88%	0,053
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 80mm)</b>	86%	0,046
<b>reforço 2 (e = 3mm; d = 90mm)</b>	87%	0,041
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 40mm)</b>	79%	0,065
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 50mm)</b>	82%	0,053
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 60mm)</b>	83%	0,045
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 70mm)</b>	86%	0,039
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 80mm)</b>	88%	0,035
<b>reforço 2 (e = 4mm; d = 90mm)</b>	88%	0,031



**Figura 47 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na secção transversal usada no reforço 2.**

Pode-se reiterar a mesma afirmação que foi consumada na análise dos resultados do reforço 1. Que a espessura tem mais significado na redução da tensão no betão, do que a quantidade de área transversal das chapas de reforço.

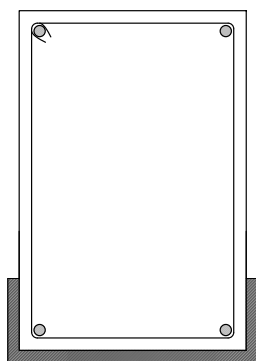
### 5.2.7. Análise do reforço 3

De modo a comprovar o que foi dito no ponto *definição da viga-tipo* (5.2.1), neste reforço ir-se-á fazer além da simulação para uma secção simétrica, também para uma secção não-simétrica. Ou seja, irá haver dois tipos de modelação: um com a chapa metálica de reforço colocada na parte inferior e superior, como nos exemplos anteriores; e outra modelação apenas utilizando a chapa metálica na parte inferior da viga. Esta simulação irá permitir confirmar a necessidade de reforçar a viga onde existe maiores esforços de flexão. Neste caso, visto ser uma viga bi-encastada, essa necessidade verificar-se-á na zona dos apoios, zona onde os momentos são negativos, portanto, existe uma tração do betão na parte superior. Além disto, poder-se-á obter uma comparação melhor com os outros reforços, isto porque, a tipologia desse reforço 3 simétrico emprega mais área de aço na secção transversal da viga,

enquanto que o reforço 3 não simétrico, tem quantidades de área de aço na secção transversal semelhantes às geometrias dos reforços 1 e 2.

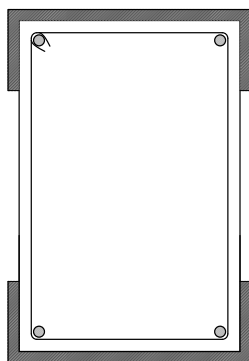
Adotar-se-á a seguinte nomenclatura para a diferenciação entre os dois tipos de reforço 3:

- Reforço 3a – Reforço não simétrico, chapas metálicas apenas na parte inferior da secção transversal da viga (figura 48).



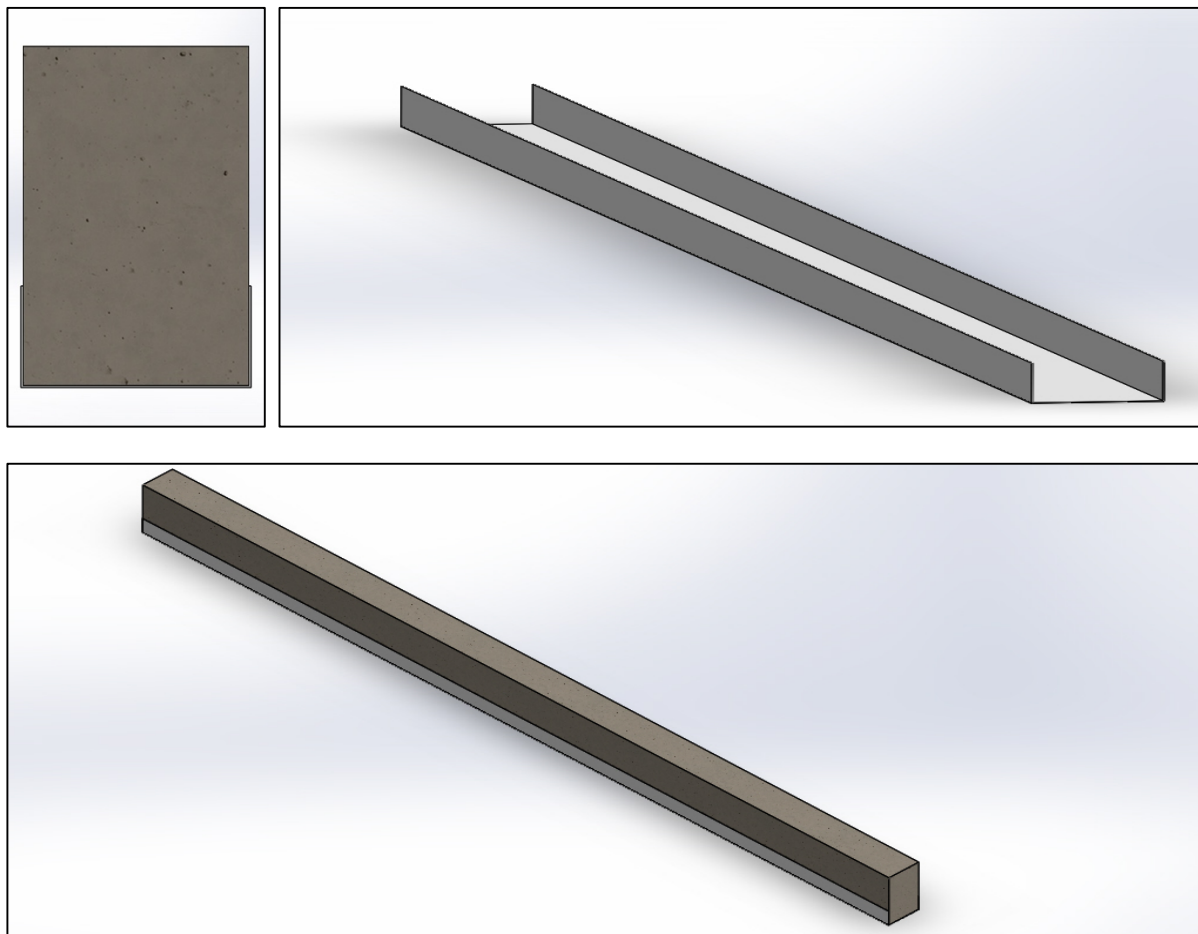
**Figura 48 - Reforço 3a.**

- Reforço 3b – Reforço simétrico, chapas metálicas na parte superior e inferior da secção transversal da viga (figura 49).



**Figura 49 - Reforço 3b**

#### 5.2.7.1. Análise do reforço 3a



**Figura 50 - Definição do reforço 3a em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.**

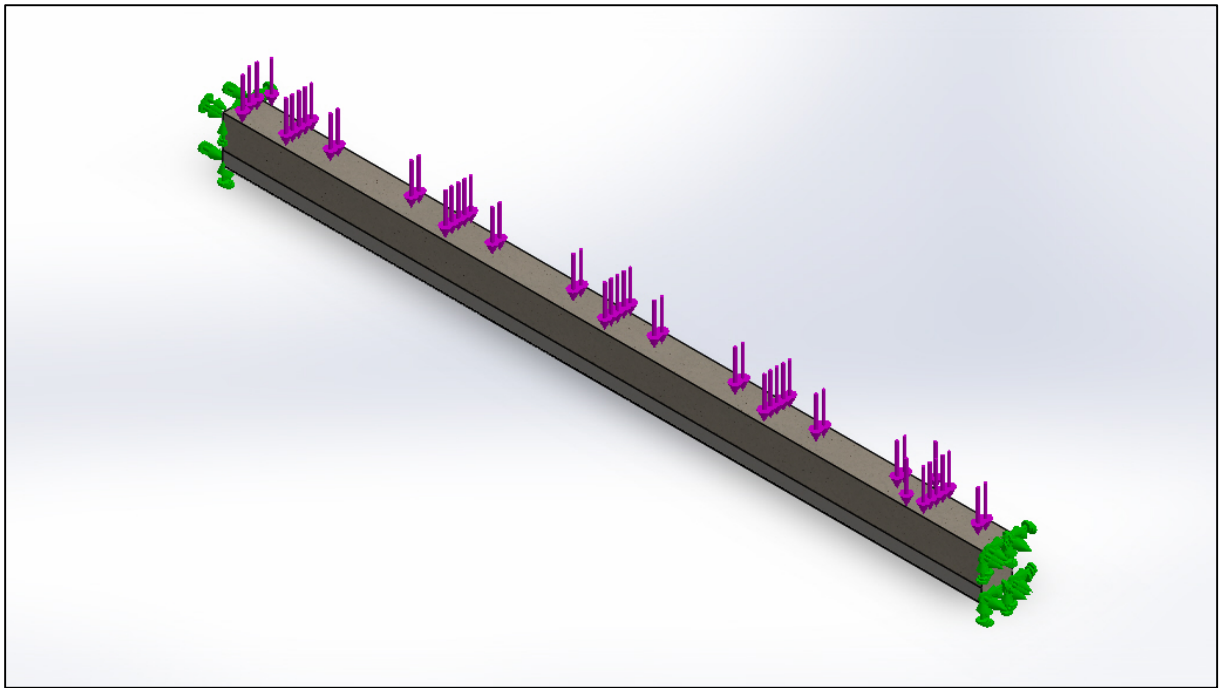


Figura 51 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 3a.

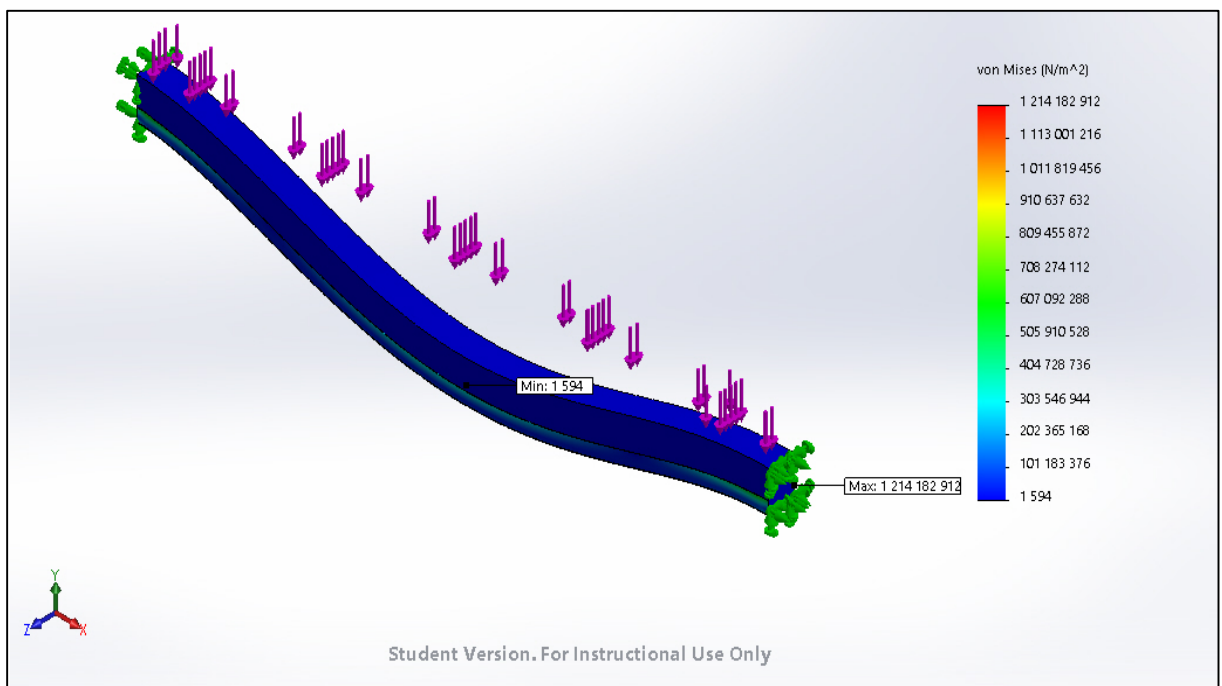
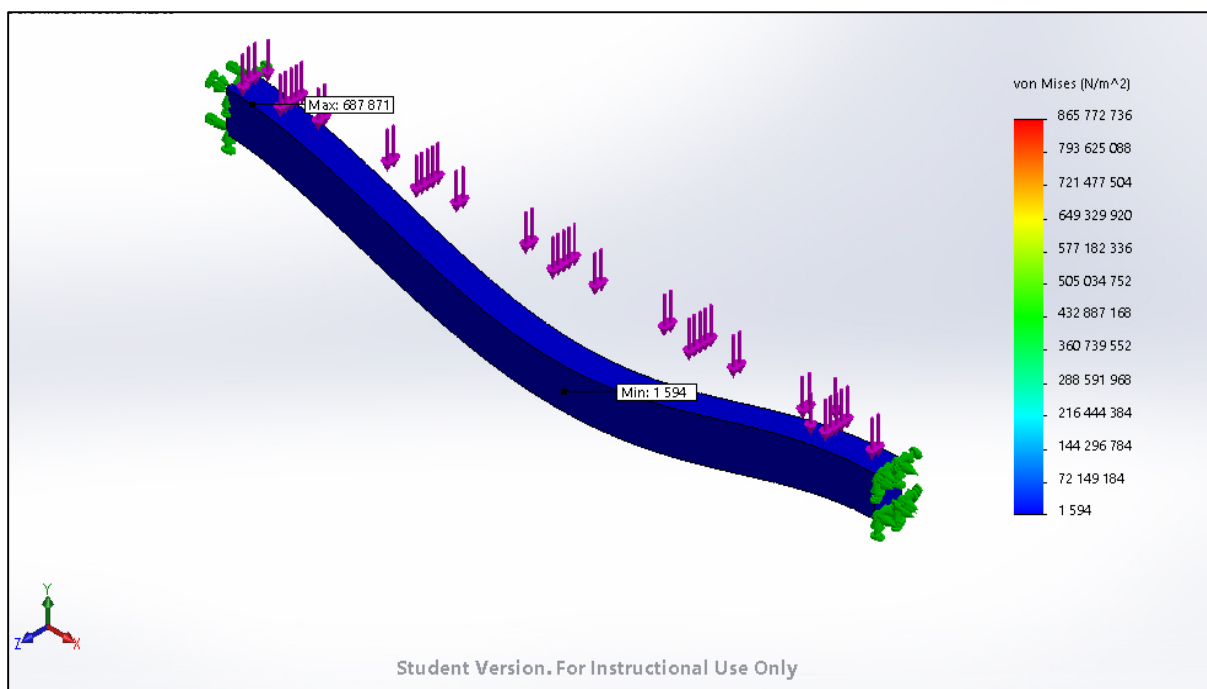


Figura 52 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3a.



**Figura 53 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3a.**

**Tabela 12 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 3a.**

	Tensão máxima no aço (MPa)	Tensão máxima no betão (MPa)	Área de aço na seção transversal (mm <sup>2</sup> )
reforço 3a (e = 2mm; h = 90mm)	1214,183	0,6879	760
reforço 3a (e = 2mm; h = 100mm)	935,677	0,6552	800
reforço 3a (e = 2mm; h = 110mm)	777,825	0,4285	840
reforço 3a (e = 3mm; h = 90mm)	893,490	0,5759	1140
reforço 3a (e = 3mm; h = 100mm)	741,124	0,4454	1200
reforço 3a (e = 3mm; h = 110mm)	656,519	0,4730	1260
reforço 3a (e = 4mm; h = 90mm)	952,682	0,2813	1520
reforço 3a (e = 4mm; h = 100mm)	703,832	0,4719	1600
reforço 3a (e = 4mm; h = 110mm)	592,797	0,4014	1680

Refira-se novamente a não proporcionalidade nem a constância de variação, conforme anteriormente referido na análise do reforço 1 e 2.

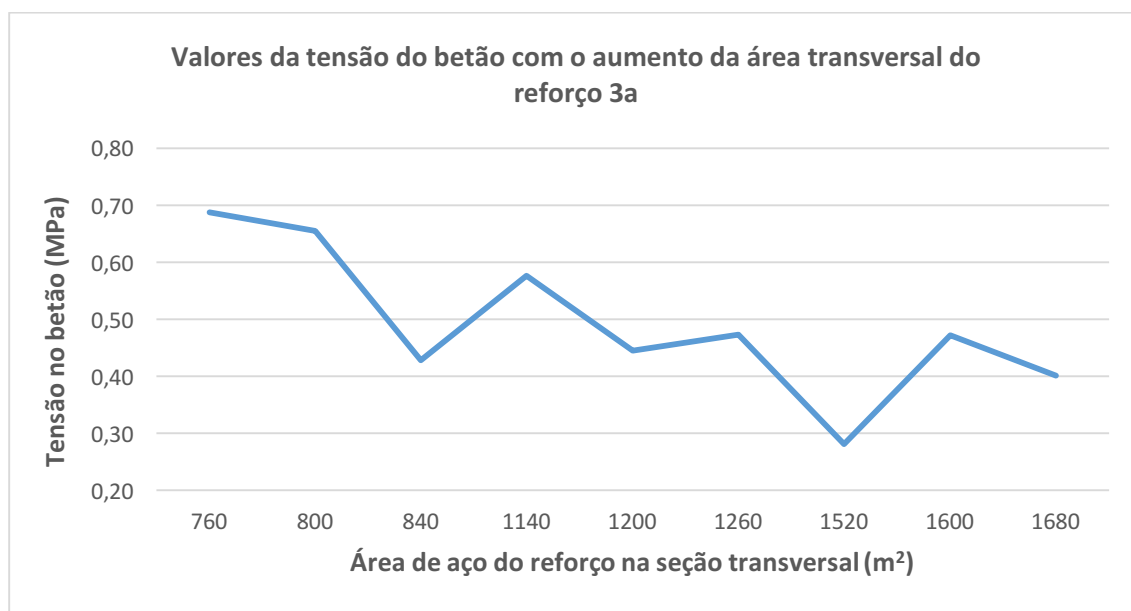


Figura 54 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.

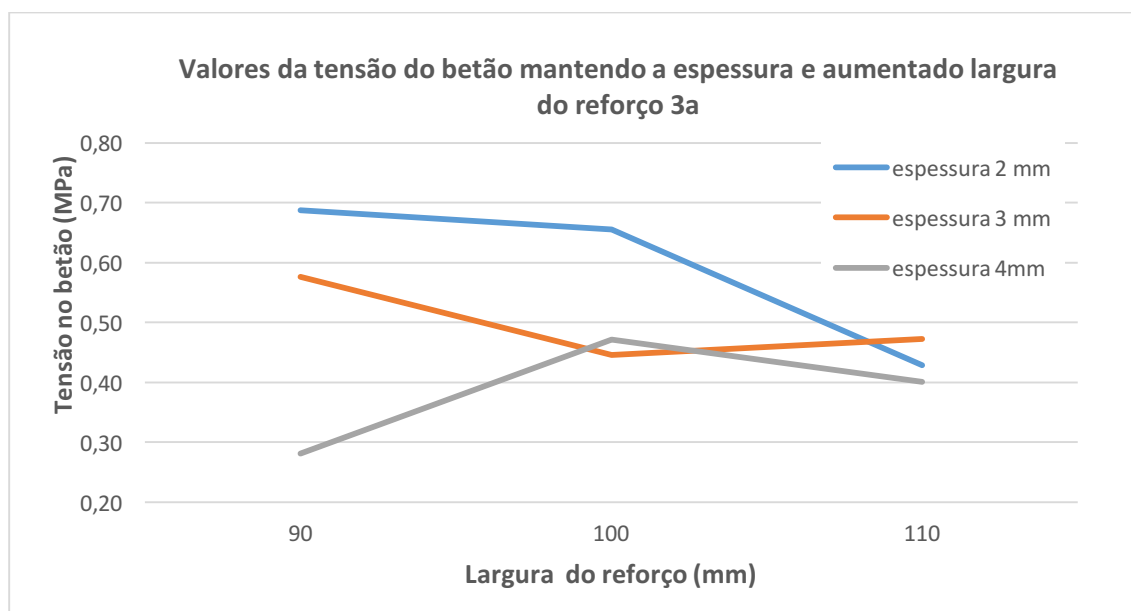
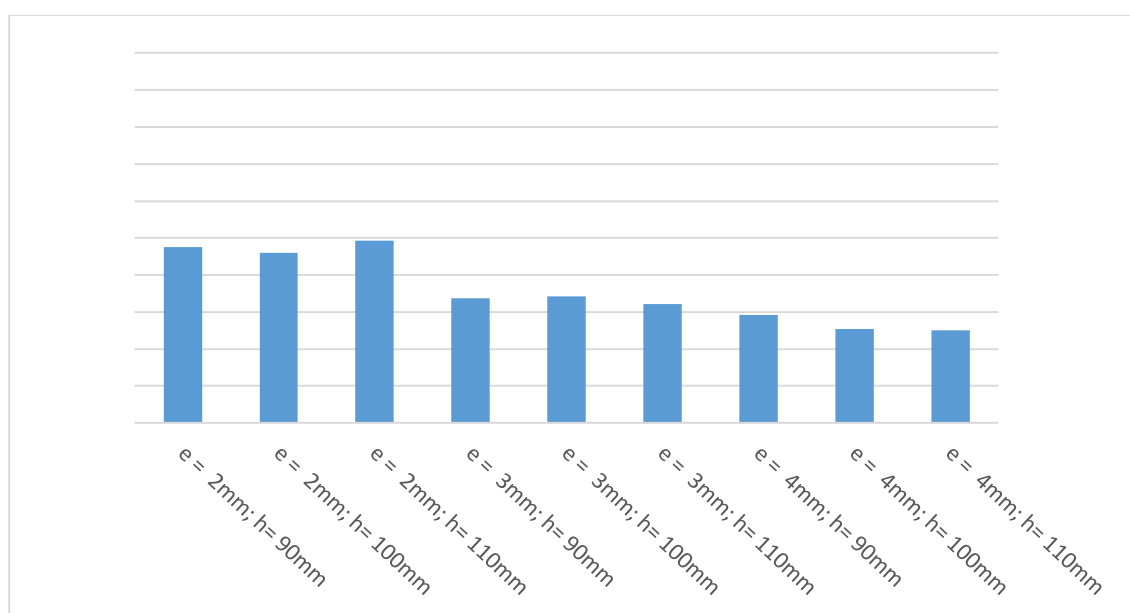


Figura 55 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 3a.



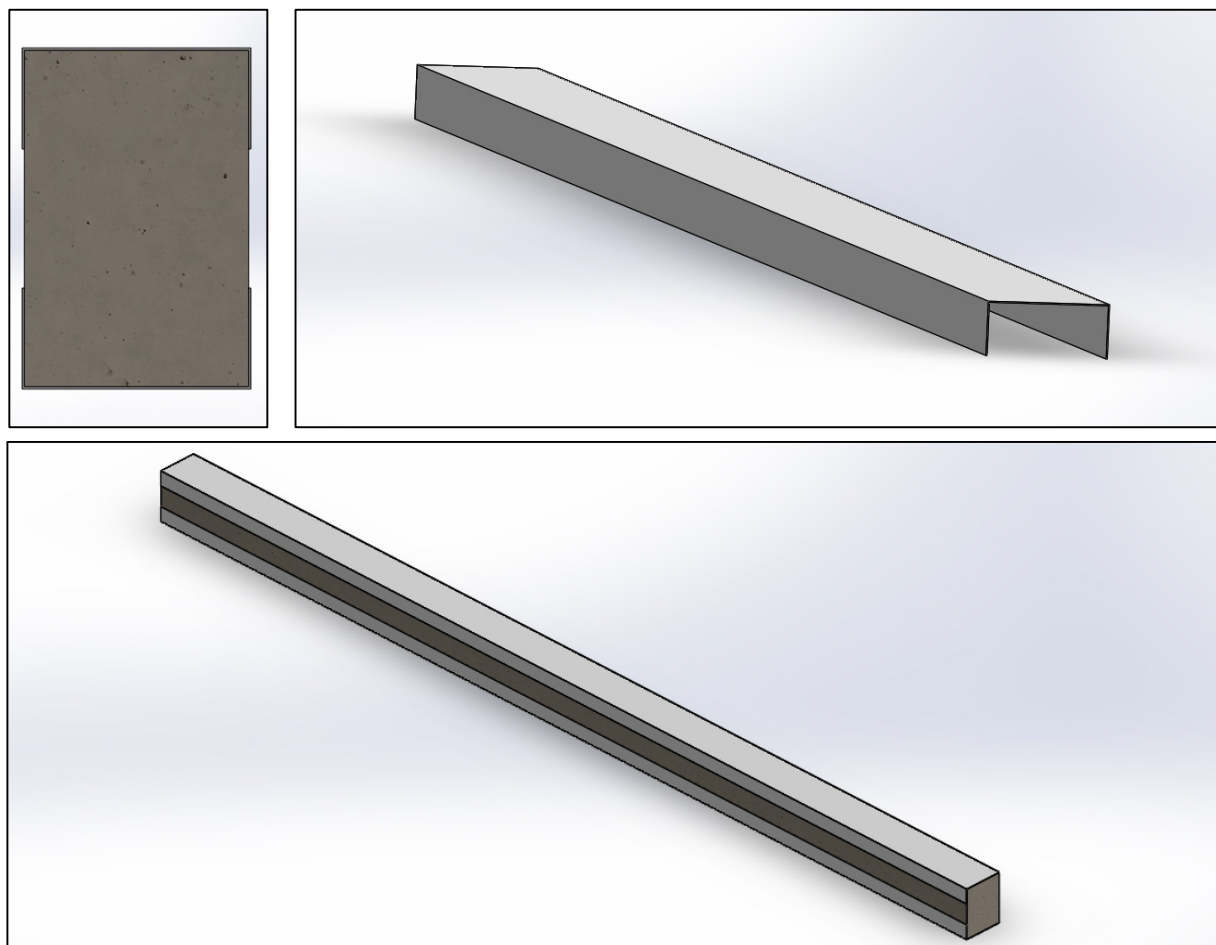
**Tabela 13 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 3a.**

	<b>Eficiência da redução da tensão do betão (%)</b>	<b>Rácio (eficiência/área de aço)</b>
<b>reforço 3a (e = 2mm; h = 90mm)</b>	77%	0,124
<b>reforço 3a (e = 2mm; h = 100mm)</b>	81%	0,103
<b>reforço 3a (e = 2mm; h = 110mm)</b>	80%	0,085
<b>reforço 3a (e = 3mm; h = 90mm)</b>	83%	0,075
<b>reforço 3a (e = 3mm; h = 100mm)</b>	85%	0,067
<b>reforço 3a (e = 3mm; h = 110mm)</b>	84%	0,059
<b>reforço 3a (e = 4mm; h = 90mm)</b>	78%	0,085
<b>reforço 3a (e = 4mm; h = 100mm)</b>	82%	0,071
<b>reforço 3a (e = 4mm; h = 110mm)</b>	81%	0,058



**Figura 56 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na secção transversal usada no reforço 3a.**

### 5.2.7.2. Análise do reforço 3b



**Figura 57 - Definição do reforço 3b em SolidWorks: aço isolado, seção da junção, e perspectiva da viga com o reforço.**

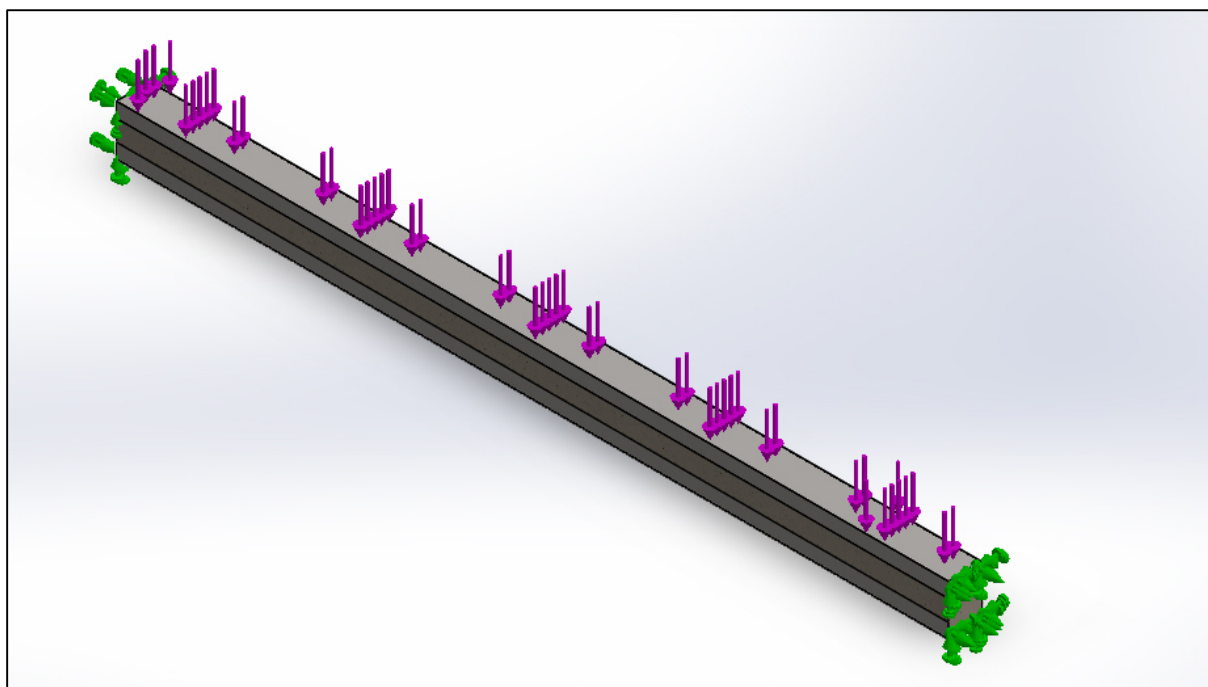


Figura 58 - Visualização das condições de apoio e cargas para a viga de betão com a aplicação do reforço 3b.

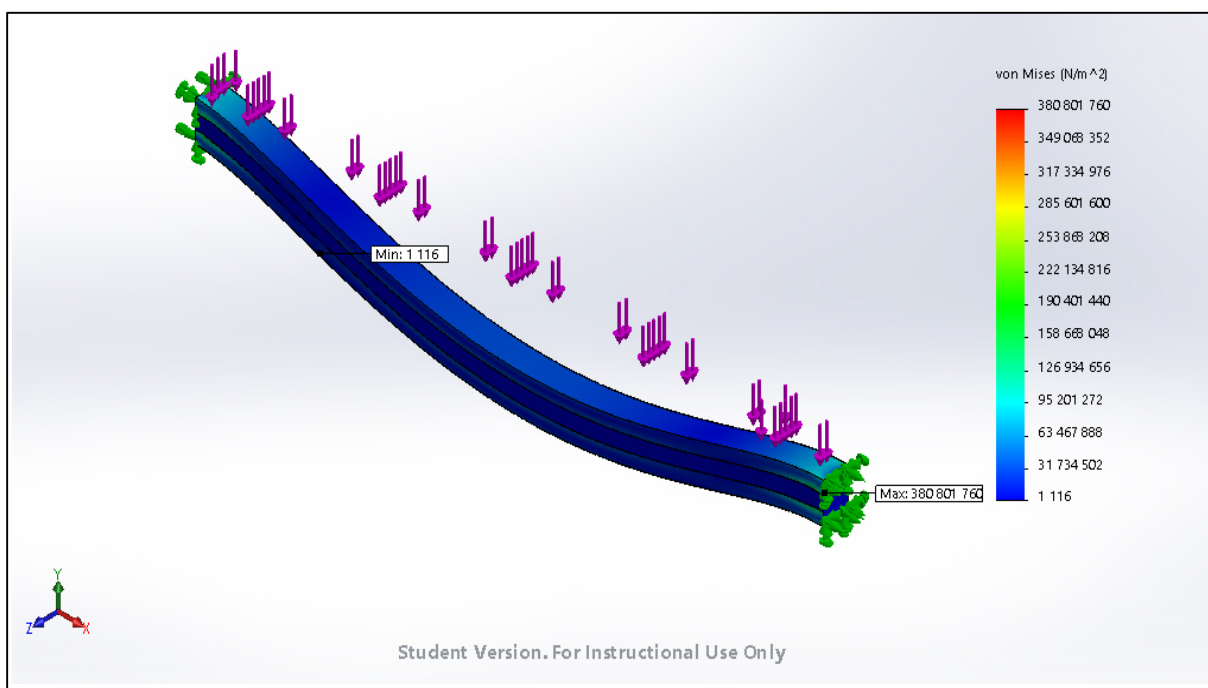
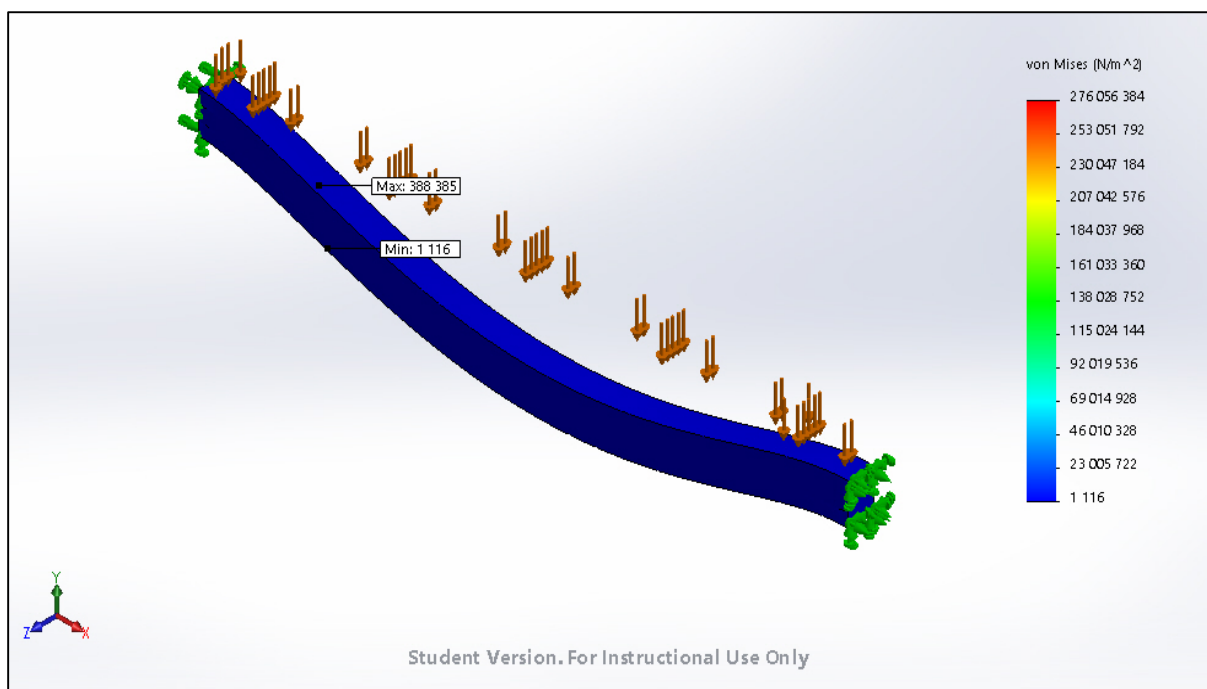


Figura 59 - Valores da tensão do aço após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3b.



**Figura 60 - Valores da tensão do betão após a simulação da viga com a aplicação do reforço 3b.**

**Tabela 14 - Valores da tensão do betão e aço para as diferentes geometrias do reforço 3b.**

	Tensão máxima no aço (MPa)	Tensão máxima no betão (MPa)	Área de aço na seção transversal (mm <sup>2</sup> )
reforço 3b (e = 2mm; h = 90mm)	380,802	0,3884	1520
reforço 3b (e = 2mm; h = 100mm)	263,544	0,2992	1600
reforço 3b (e = 2mm; h = 110mm)	252,207	0,2850	1680
reforço 3b (e = 3mm; h = 90mm)	353,869	0,3802	2280
reforço 3b (e = 3mm; h = 100mm)	322,371	0,3293	2400
reforço 3b (e = 3mm; h = 110mm)	212,509	0,2402	2520
reforço 3b (e = 4mm; h = 90mm)	343,419	0,2482	3040
reforço 3b (e = 4mm; h = 100mm)	233,100	0,2491	3200
reforço 3b (e = 4mm; h = 110mm)	203,707	0,2076	3360

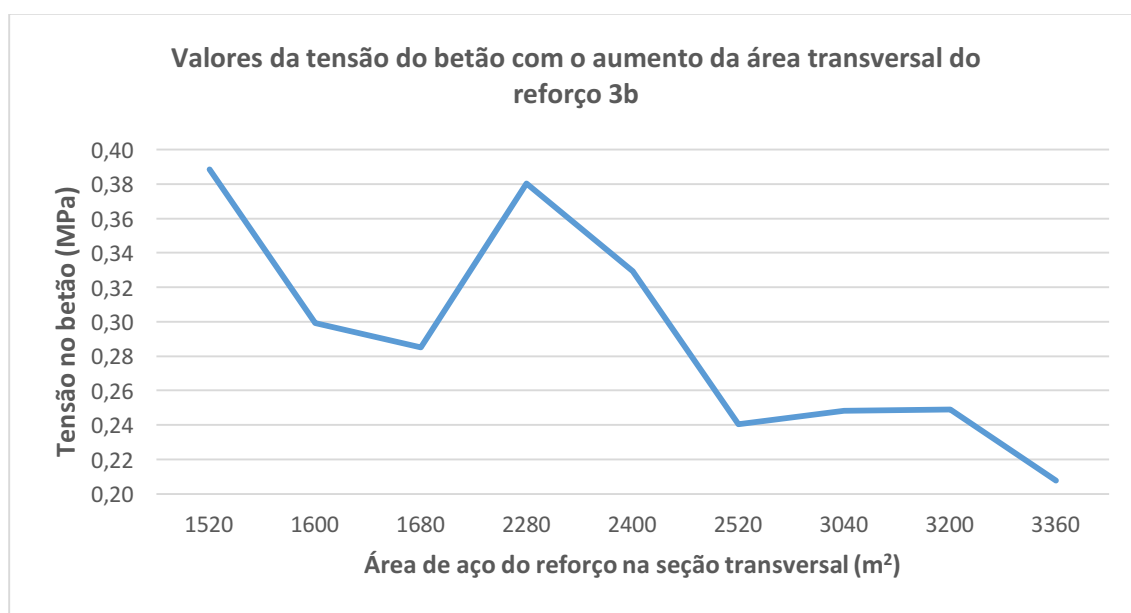


Figura 61 - Gráfico da diminuição da tensão do betão com o aumento da área de aço do reforço na seção transversal da viga.

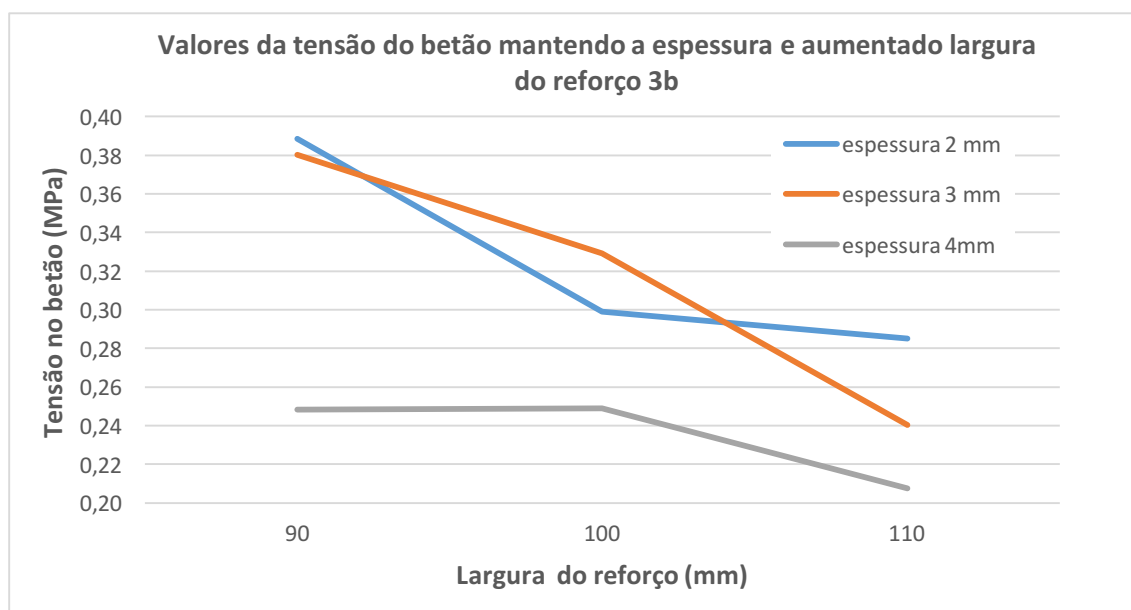
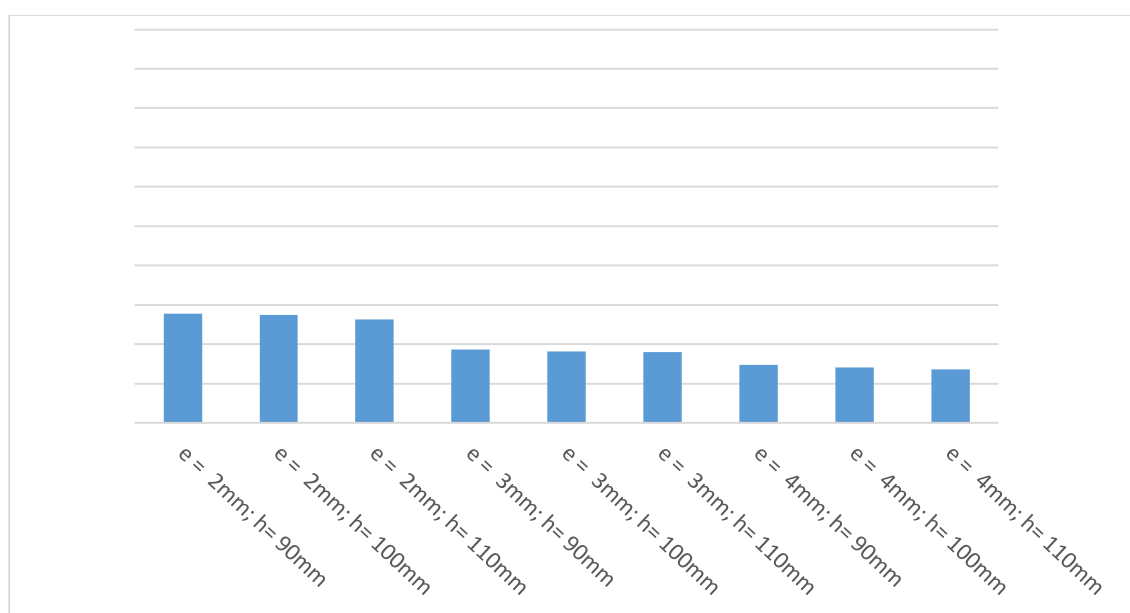


Figura 62 - Gráfico da redução da tensão do betão para as diferentes espessuras do reforço 3b.

**Tabela 15 - Relação de eficiência da diminuição da tensão do betão confrontada com a quantidade de área de aço utilizada na secção transversal do reforço 3b.**

	<b>Eficiência da redução da tensão do betão (%)</b>	<b>Rácio (eficiência/área de aço)</b>
reforço 3a (e = 2mm; h = 90mm)	84%	0,056
reforço 3a (e = 2mm; h = 100mm)	88%	0,055
reforço 3a (e = 2mm; h = 110mm)	89%	0,053
reforço 3a (e = 3mm; h = 90mm)	85%	0,037
reforço 3a (e = 3mm; h = 100mm)	87%	0,036
reforço 3a (e = 3mm; h = 110mm)	90%	0,036
reforço 3a (e = 4mm; h = 90mm)	90%	0,030
reforço 3a (e = 4mm; h = 100mm)	90%	0,028
reforço 3a (e = 4mm; h = 110mm)	92%	0,027



**Figura 63 - Rácio entre a eficiência da redução da tensão no betão com área de aço do reforço na secção transversal usada no reforço 3b.**

### 5.2.8. Análise global dos reforços

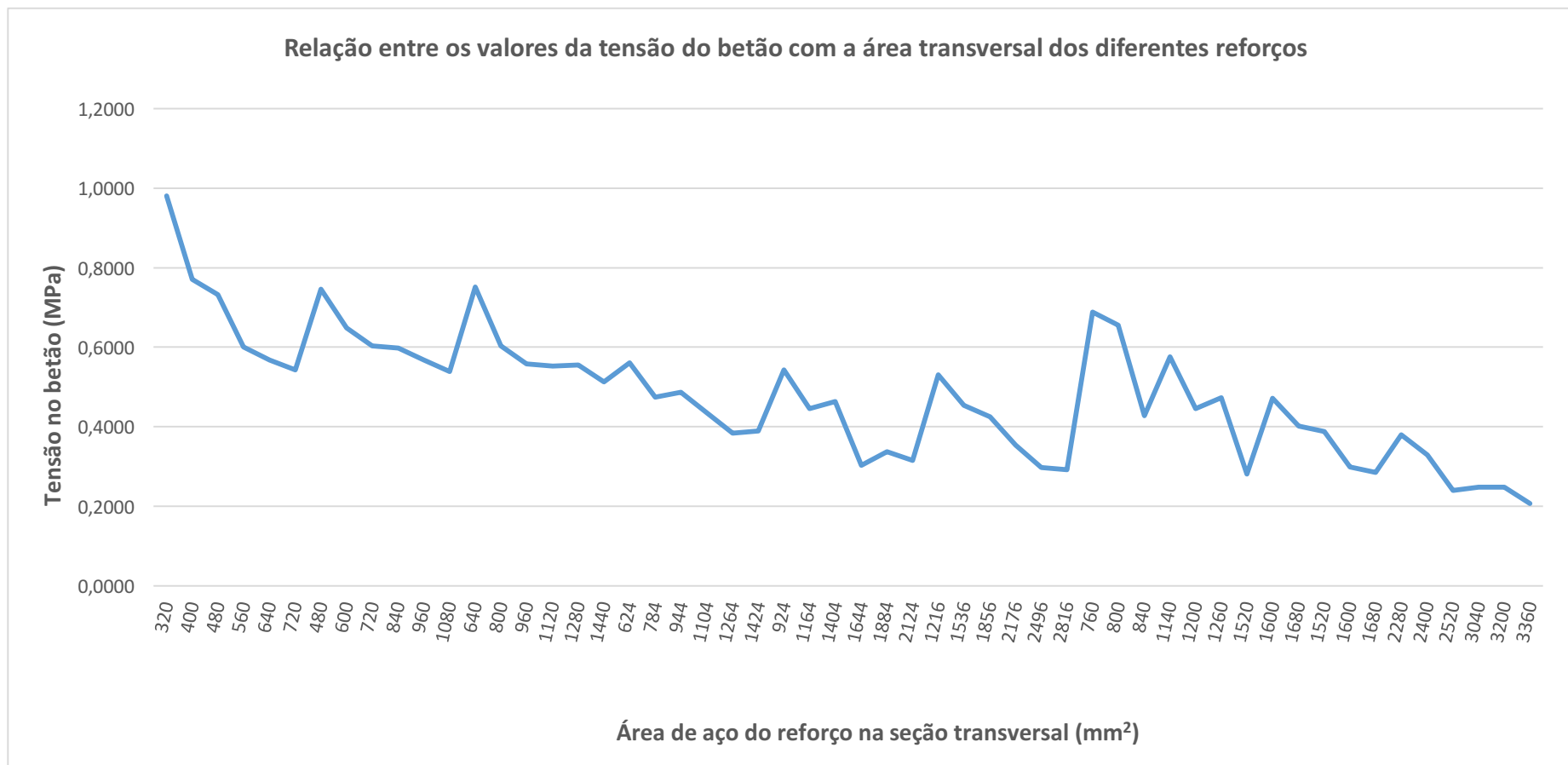
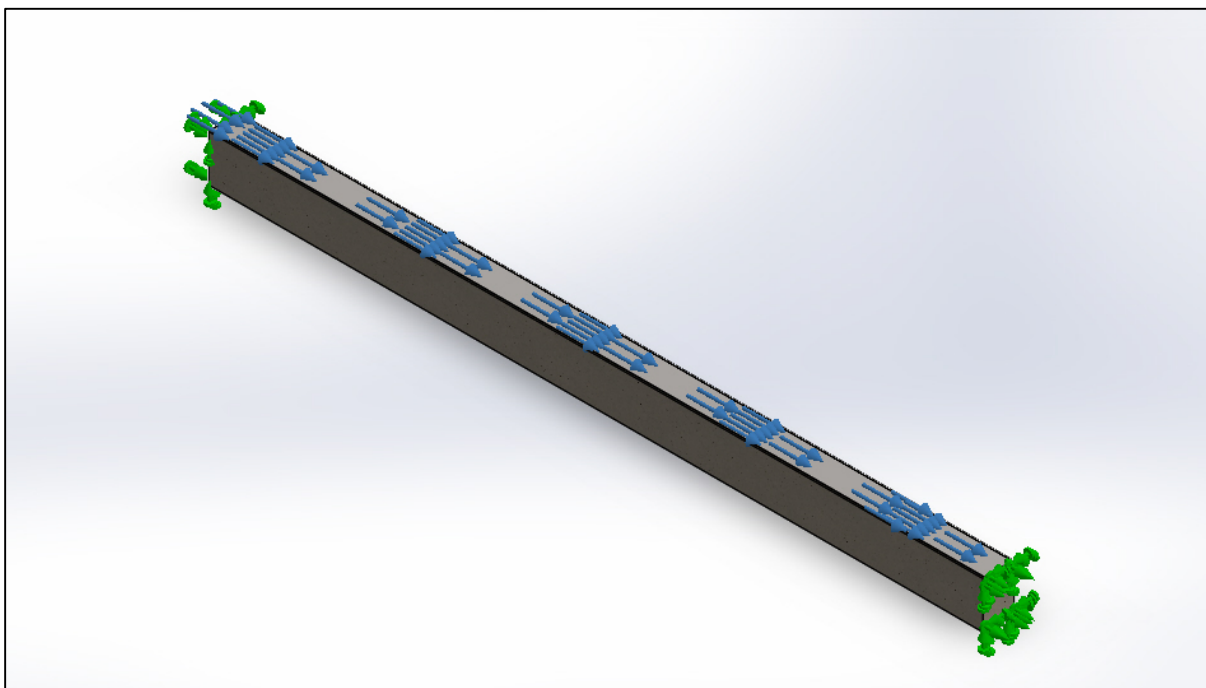


Figura 64 - Gráfico da variação da tensão do betão com o variação da área de aço de todos os reforço na seção transversal da viga.

### 5.2.9. Metodologia de cálculo

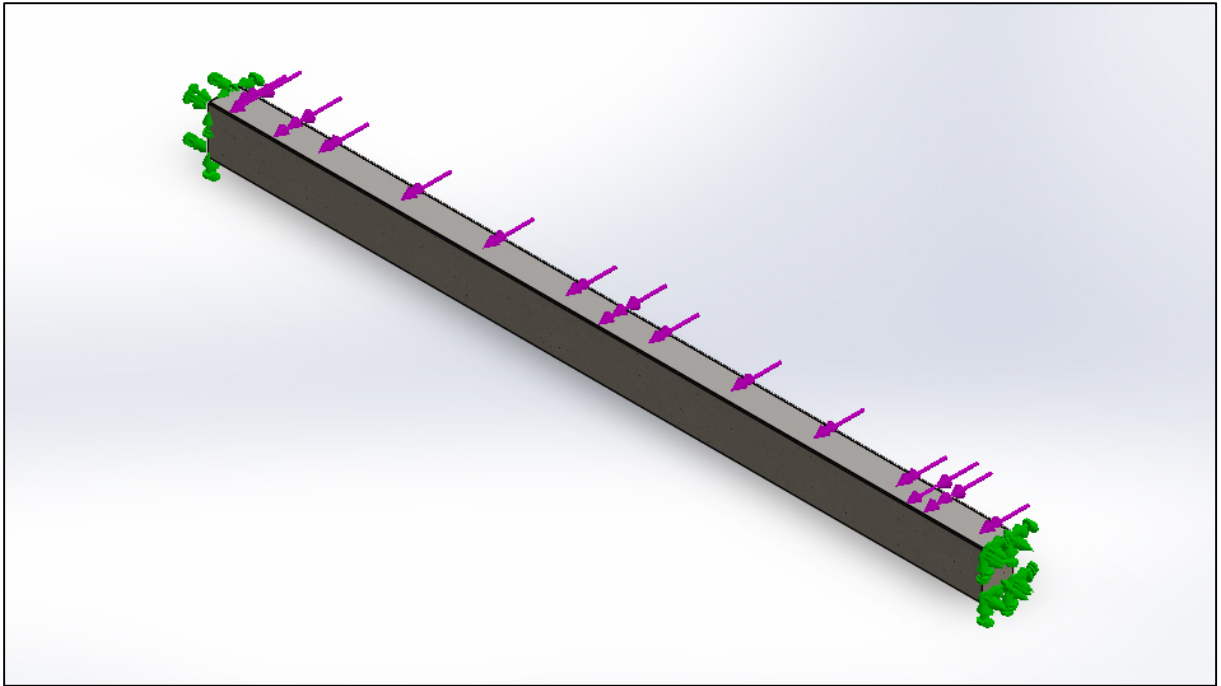
A modelação exposta anteriormente foi feita para o caso simples de uma viga bi-encastada com carga transversal (que causa momento fletor e esforço transverso na viga). O objetivo era além de descobrir a melhor tipologia de reforço para o caso em concreto, também oferecer uma metodologia de cálculo para encontrar a melhor situação de reforço para outros tipos de condicionantes.

Nas seguintes figuras pode-se observar a mesma viga usada na simulação, mas com diferentes tipos de cargas aplicadas.

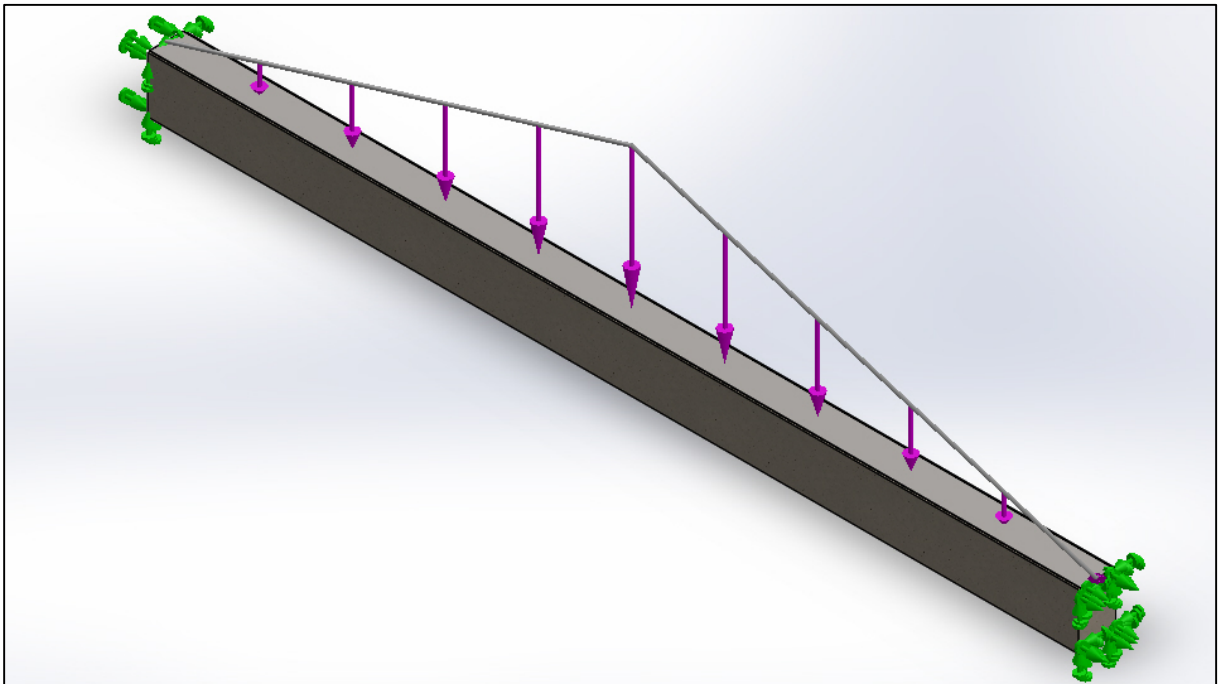


**Figura 65 – Viga usada na simulação SolidWorks com diferente carga aplicada, na direção do eixo da viga.**

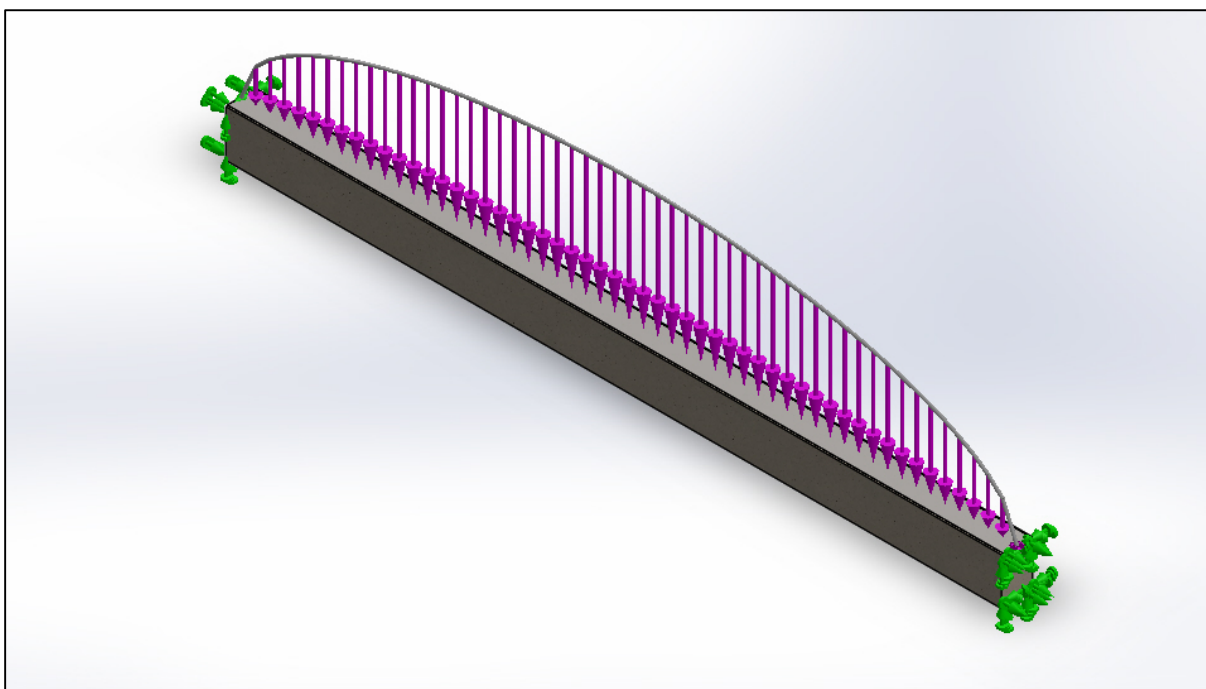




**Figura 66 - Viga usada na simulação SolidWorks com diferente carga aplicada, na direção perpendicular ao eixo da viga.**



**Figura 67 - Viga usada na simulação SolidWorks com carga vertical distribuída não-uniforme.**



**Figura 68 - Viga usada na simulação SolidWorks com outra carga vertical distribuída não-uniforme.**

Além de ser possível mudar o tipo de carga a que o elemento está sujeito, é possível alterar os parâmetros resistentes dos materiais envolvidos. Neste estudo, como já explicado anteriormente, utilizou-se um betão com pouca resistência, e o aço como material de reforço.

Outra alteração que pode ser introduzida é a geometria. Pode-se facilmente modificar a geometria da secção transversal do elemento, ou construir outro tipo de elemento. Como por exemplo pilares, lajes ou mesmo nós entre vigas-pilares, alterando também as condições de apoio, variando entre apoios simples, ou duplos, tal como slides ou encastramento simples. Assim é possível adequar o modelo geométrico ao caso real de intervenção, e proceder tal como foi feito neste capítulo à análise de tensões, de modo a encontrar a solução mais vantajosa.

# *Capítulo 6*

---

## *Conclusões*



## 6. CONCLUSÕES

Nas últimas décadas tem-se vindo a assistir a uma degradação cada vez mais acentuada do edificado. Isto deve-se ao aparecimento de anomalias estruturais e funcionais nos edifícios, cuja causa se deve essencialmente a erros desde a fase de conceção/projeto à fase de construção e utilização.

Os primeiros capítulos do presente trabalho baseiam-se na aprendizagem e recolha de informação acerca do comportamento das estruturas de betão no âmbito patológico. Apenas depois de conhecer as propriedades e as particularidades dos elementos que têm necessidade de ser reforçados, foi possível passar ao estudo das técnicas de reforço. Houve bastantes dificuldades nesta pesquisa de informações, pela disparidade que existe nestes conteúdos.

A presente dissertação tinha como objetivo estudar e testar as diferentes tipologias de reforço através de chapas metálicas em elementos de betão armado, criando assim uma metodologia de dimensionamento para escolha de soluções mais apropriadas. Os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos, tendo em conta que, conscientemente, ficaram por abordar algumas algumas técnicas de reforço de estruturas, e que nem todas as matérias foram tratadas com a mesma profundidade, é o caso das ligações entre as chapas metálicas e as estruturas de betão armado, ou o desenvolvimento de outras tipologias perante outras condições de carga ou restrições nos modelos desenvolvidos em SolidWorks.

O programa escolhido para a modelação, o SolidWorks, demonstrou ser bastante útil para a modelação dos reforços. A aprendizagem deste software foi demorada, daí ter condicionado o estudo feito. Existem bastantes variáveis neste programa que poderiam ser úteis para o estudo do comportamento mecânico dos elementos de betão reforçados, mas dada a falta de tempo para a concretização desta dissertação, apenas foi possível ensaiar alguns casos simples. Foram feitos alguns ensaios com um pilar como exemplo, elaborado diferentes tipos de encamisamento como reforços, mas as grandes deformações causadas pelas grandes cargas de compressão, limitou o programa. O facto de o processo de cálculo do software ser demorado, condicionou

o número de ensaios feitos. Daí ter sido preferencial examinar mais modelações da viga, para ser possível conseguir objetos de comparação suficientes para retirar algumas ilações.

Relativamente aos modelos calculados, como pode ser possível verificar nas análises do capítulo 5, o aumento da área de aço nos reforços com chapas metálicas, aumenta de forma parcialmente linear a eficácia na redução da tensão do betão armado. Foi também provado que, a espessura tem mais influência nessa eficácia, ao nível total da área transversal de reforço.

Existem mais softwares onde existe a possibilidade de elaborar este tipo de estudos, no entanto optou-se por este, pois é um programa que não pertence à área curricular de Engenharia Civil, e por ser muito usado no mercado industrial era do interesse aprender algo novo, demonstrando a possibilidade de aplicação aos conteúdos da Engenharia Civil, mais concretamente à reabilitação.

Refere-se que, existe necessidade de produção de um documento orientador onde toda a informação relacionada com a temática da Reabilitação de Estruturas venha apresentada de forma objetiva, integrada e pormenorizada e que sirva de referência para o projeto de reabilitação de estruturas. Este trabalho pretendeu dar um contributo na busca desse objetivo, na medida em que, está formada uma possível metodologia de cálculo para análise de diferentes modelos de reforço.

### **6.1. Possíveis ações de desenvolvimento no futuro**

Tendo em conta o trabalho desenvolvido nesta campanha, propõe-se um estudo mais detalhado das diferentes tipologias de reforço, incluindo outro tipo de elementos, como lajes e nós viga-pilar, e caracterizar o seu dimensionamento mais detalhadamente.

Do mesmo modo, para melhorar a metodologia de cálculo elaborada neste presente trabalho, fazer mais modelações para os exemplos já expostos, assim como diferenciar o modelo usado. Além de uma viga, fazer também a modelação de pilares, lajes e nós viga-pilar, de maneira a ir ao encontro com o que se visualiza nos

edificados que necessitam de intervenções e com isto, elaborar uma marcha de cálculo para um dos casos.





## *Referências Bibliográficas*

---



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, J. (1994). *Recuperação de Estruturas de Betão Armado*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Braga.
- Aguiar, J. (2002). *Reabilitação de Estruturas de Betão Armado*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Braga.
- Aguiar, J., Cabrita, A. R., & Appleton, J. (2006). *Guião de apoio à reabilitação de edifícios habitacionais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa: LNEC.
- Andrade, M. G. (2015). *Estudo numérico sobre o reforço de pilares de betão armado com cantoneiras e presilhas metálicas. Análise Paramétrica e Modelo de Cálculo*. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga.
- Appleton, J. (1999). Análise de Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*.
- Appleton, J., & Costa, A. (2011). *Apontamentos da cadeira de "Reabilitação e Reforço de Estruturas"*. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.
- Appleton, J., & Gomes, A. (1999). Reforço de Estruturas de Betão Armado por Adição de Armaduras Exteriores. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, nº 41.
- Bento, F., & Rodrigues, J. (2003). *Reforço de Pilares por Encamisamento Metálico*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil. FEUP.
- BETÓN, C. E.-I. (1993). *FIP Model Code 1990*. Bulletin d'information nº 213/214. Lausanne: CEN.
- Cachim, P. B., & Morais, M. M. (2013). *Estruturas de Betão - Bases de cálculo*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.

- Campos, L. E. (2006). *Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Carvalho, M. F. (2012). *Reabilitação sustentável de estruturas em betão armado*. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães.
- Castro, E. M. (1999). *Patologia dos Edifícios em Estrutura Metálica*. Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto.
- CEN. (s.d.). *Eurocode 2 - Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- CEN. (s.d.). *Eurocode 3 - Design of steel structures*. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- Correia, S. F. (2014). *Catálogo de técnicas de diagnóstico em elementos estruturais de edifícios correntes em betão armado*. Instituto Superior Técnico, Academia Militar, Lisboa.
- Costa, A. (2006). As patologias e as reabilitações estruturais. *2º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifício*. Porto: FEUP.
- Costa, A. (2012). *Apontamentos da cadeira "Patologias da Construção"*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Costa, A. (2013). *Apontamentos da cadeira "Conservação e Reabilitação de Edifícios"*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Cóias, V. (2006). *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. Instituto Superior Técnico. Lisboa: IST Press.

- Gomes, A., & Appleton, J. (1997). Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, N.º. 42.
- Lopes, D. J. (2009). *Viadutos Mistos Aço-Betão*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro.
- Lopes, M. (2000). *Reforço à flexão mediante colagem de armadura externa: um estudo de durabilidade*. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas.
- Moura, D. d. (2012). *Deterioração e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Piffer, V. S. (2016). *EcivilUFES*. Obtido de <https://ecivilufes.wordpress.com/>
- Premonta. (2015). *Vantagens das Estruturas Metálicas em Edifícios*. Obtido em 25 de Novembro de 2015, de premonta.com: <http://premonta.com.br/vantagens-das-estruturas-metalias-em-edificios/>
- Rocha, P. A. (2011). *Reforço e Reparação de Pilares de Edifícios de Betão Armado em Zonas Sísmicas*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto: FEUP.
- Simões, M. (2007). *Reforço de Vigas de Concreto Armado por Encamisamento Parcial*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Sousa, Á. F. (2008). *Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil.
- STAP. (2016). *www.stap.pt*. Obtido de <http://www.stap.pt/index.php?id=116&det=3>
- Systemes, D. (2016). *www.solidworks.com*. Obtido de DS SolidWorks: <http://www.solidworks.com/>